

DEVICE AND METHOD FOR GENERATING LASER LIGHT

Publication number: JP2002311467 (A)

Publication date: 2002-10-23

Inventor(s): MASUDA HISASHI

Applicant(s): SONY CORP

Classification:

- international: G02F1/37; G02F1/35; H01S3/10; H01S3/109; G02F1/35;
H01S3/10; H01S3/109; (IPC1-7): G02F1/37; H01S3/10;
H01S3/109

- European: G02F1/35W2

Application number: JP20010112682 20010411

Priority number(s): JP20010112682 20010411

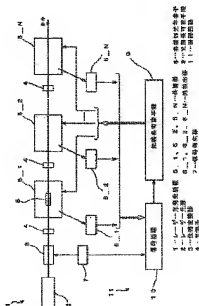
Also published as:

JP3865511 (B2)
US2002171912 (A1)
US6862131 (B2)

Abstract of JP 2002311467 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To realize stable locking and to evade accompaniment of rise of cost and increase of power consumption for the purpose in a laser light generator having a plurality of resonators.

SOLUTION: In the laser light generator 1, a laser light source 2, a phase modulator 3 and a signal generator 7 to impress a modulation signal on it and the resonators 5-X (X=1, 2, etc.), are provided. And nonlinear optical elements 8 are provided in a resonator 5-1 and an optical path length varying means 9 to vary length of optical paths of the respective resonators is provided. A control circuit 11 of negative feedback structure regarding control of length of the resonators is formed by obtaining error signals by using detection signals of photodetectors 6-X (X=1, 2, etc.), to receive light from the respective resonators and controlling the optical path length varying means 9 according to an FM side band method. The laser light generator is constituted so that laser light is made incident on the resonator 5-1 after phase modulation is given to it, light to be generated by the nonlinear optical element 8 is made incident on a resonator 5-2 and the plurality of resonators are simultaneously held as a resonated state.



Data supplied from the esp@cenet database — Worldwide

TECHNICAL FIELD

[Field of the Invention]In the laser beam generator using a laser light source and two or more resonators, this invention relates to the art for realizing stable locking using a cross modulation carrier.

PRIOR ART

[Description of the Prior Art]As a stable resonator locking method in a laser beam generator, the FM side band method ("Pound-Drever-Hall Locking" law) is known, and it is widely used for locking of the external resonator ranging from the near infrared to a light region.

EFFECT OF THE INVENTION

[Effect of the Invention]According to the invention concerning claim 1 or claim 16, so that clearly from the place indicated above. Of course, since it is not necessary to form a phase modulator in each preceding paragraph to each resonator, it can lock two or more resonators simultaneously using a small number of phase modulators that stable locking of a resonator becomes possible by using the FM side band method rather than before. In the application to ultraviolet rays etc., it is not necessary to use a special phase modulation.

[0109]According to the invention concerning claim 2 or claim 17, each resonator can be locked more in stability by using the modulating signal of different frequency.

[0110]Since it is hard to receive the influence by the temperature change of a nonlinear optical element, etc. according to the invention concerning claims 3 thru/or 6 and claims 18 and 19, it is stabilized more and wavelength changing using the element concerned can be performed efficiently.

[0111]According to the invention concerning claim 7 or claims 20 and 21, each resonator can be simultaneously locked using a signal with the frequency component corresponding to each resonator.

[0112]According to the invention concerning claim 8 or claim 22, a signal-noise ratio is high and locking stable to disturbance becomes possible.

[0113]According to the invention concerning claim 9, a desired output can be obtained by amplification of a laser beam.

[0114]According to the invention concerning claim 10, the outputted ray of short wavelength can be obtained by a harmonic generation.

[0115]According to the invention concerning claim 11, the outputted ray of various wavelength can be obtained by generating of a sum frequency or a difference cycle.

[0116]A laser beam can be entered one by one to the resonator arranged without passing through a phase modulator, and each resonator can be locked simultaneously, and according to the invention concerning claim 12 or claim 23, there are few losses of light volume and it is efficient.

[0117]Since according to claims 13 thru/or 15 and claims 24 thru/or 26 an error signal can be acquired using the detecting signal of catoptric light while being able to distinguish and use each

modulation frequency about the first resonator and second resonator, it is advantageous to locking of a resonator.

TECHNICAL PROBLEM

[Problem(s) to be Solved by the Invention]However, if it is in the conventional device, there is a problem as shown below.

[0005]- In the case where change arises in the incident light quantity to a resonator, etc. in an ellipsometric method etc., the case where it has an optical element (element with the optical absorption especially in an ultraviolet region) with absorption in a resonator, etc., The characteristic of the optical element concerned changes in connection with the temperature change by generation of heat, it is easy to generate offset of wavelength for the reason phase delay quantity will change, and there is a problem in stability.

[0006]- The FM side band method or "Pound-Drever-Hall Locking" In order to generate an error signal, it is necessary to use a phase modulator and to stand a side wave (sideband wave) in the method of calling law, and. When modulating especially ultraviolet radiation and standing a side wave, the highly efficient phase modulator with low operating voltage whose transmissivity is high is needed. However, since acquisition of such a modulator is difficult, in using an available phase modulator, the circuit etc. which drive the high frequency of high tension are needed, and there is a problem in respect of the fault of causing a cost rise and increase of power consumption, and practicality.

[0007]- Since the number of the phase modulators arranged at each stage will also increase if the number of resonators increases when carrying out locking of each resonator simultaneously in the composition using two or more resonators, it becomes a cause which causes enlargement and a cost rise of a device. With the conventional composition, it is because a phase modulator is arranged at the preceding paragraph of each resonator, respectively, and, as for this, the disposition space of the part will become large.

[0008]Then, in the laser beam generator provided with two or more resonators, this invention makes it SUBJECT to make it accompanied by neither a cost rise nor increase of power consumption while realizing stable locking therefore.

MEANS

[Means for Solving the Problem]A laser beam generator concerning this invention is provided with a component shown below in order to solve above-mentioned SUBJECT.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1]It is an explanatory view showing the example of basic constitution concerning this invention.

[Drawing 2]It is a figure showing the example of composition of this invention with drawing 3, and this figure shows the important section about an entire configuration.

[Drawing 3]It is a figure showing the example of composition of the control system containing a phase modulator and a photodetector.

[Drawing 4]They are graph charts showing the delta dependency of relative reflectance.

[Drawing 5] They are graph charts showing the delta dependency of relative transmittance.

[Drawing 6] It is a figure expanding and showing an important section about the delta dependency of relative reflectance.

[Drawing 7] It is a figure showing the delta dependency of an error signal.

[Drawing 8] It is a figure for explaining the relation between the frequency dependence of reflectance, and modulation frequency.

[Drawing 9] It is a figure showing another example of composition concerning this invention.

[Description of Notations]

1, 12, 19 -- A laser beam generator, 2 and 2A, 2B, 2C -- Laser light source, 3, 25 [-- The second resonator, 6_X (X= 1, 2, --) / -- A photodetector, 7 / -- A signal generator, 8, 20 / -- A nonlinear optical element, 9 / -- A light-path-length variable means, 11 / -- Control circuit] -- A phase modulator, 4, 15, 23, 26 -- An optical system, 5_1 -- The first resonator, 5_2

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] In the laser beam generator using a laser light source and two or more resonators, this invention relates to the art for realizing stable locking using a cross modulation carrier.

[0002]

[Description of the Prior Art] As a stable resonator locking method in a laser beam generator, the FM side band method ("Pound-Drever-Hall Locking" law) is known, and it is widely used for locking of the external resonator ranging from the near infrared to a light region.

[0003] The method (please refer to the literature of Hansch, Couillaud, Optics Communications, and 1980 grades.) of using polarization besides this method is mentioned. For example, while entering in a resonator the laser beam which penetrated the wavelength plate, an error signal is acquired based on the detecting signal of two beams with which the polarization conditions from a resonator differ, and the locking method of holding the resonance state of a resonator is proposed.

[0004]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, if it is in the conventional device, there is a problem as shown below.

[0005]- In the case where change arises in the incident light quantity to a resonator, etc. in an ellipsometric method etc., the case where it has an optical element (element with the optical absorption especially in an ultraviolet region) with absorption in a resonator, etc., The characteristic of the optical element concerned changes in connection with the temperature change by generation of heat, it is easy to generate offset of wavelength for the reason phase delay quantity will change, and there is a problem in stability.

[0006]- The FM side band method or "Pound-Drever-Hall Locking" In order to generate an error signal, it is necessary to use a phase modulator and to stand a side wave (sideband wave) in the method of calling law, and. When modulating especially ultraviolet radiation and standing a side wave, the highly efficient phase modulator with low operating voltage whose transmissivity is high is needed. However, since acquisition of such a modulator is difficult, in using an available phase modulator, the circuit etc. which drive the high frequency of high tension are needed, and

there is a problem in respect of the fault of causing a cost rise and increase of power consumption, and practicality.

[0007]- Since the number of the phase modulators arranged at each stage will also increase if the number of resonators increases when carrying out locking of each resonator simultaneously in the composition using two or more resonators, it becomes a cause which causes enlargement and a cost rise of a device. With the conventional composition, it is because a phase modulator is arranged at the preceding paragraph of each resonator, respectively, and, as for this, the disposition space of the part will become large.

[0008]Then, in the laser beam generator provided with two or more resonators, this invention makes it SUBJECT to make it accompanied by neither a cost rise nor increase of power consumption while realizing stable locking therefore.

[0009]

[Means for Solving the Problem]A laser beam generator concerning this invention is provided with a component shown below in order to solve above-mentioned SUBJECT.

[0010]- A laser beam. Light path length of a nonlinear optical element and each resonator stationed in a resonator of two or more resonator and firsts containing the second resonator arranged in the latter part rather than a signal generator which generates a modulating signal impressed to a laser light source and a phase modulator to output, and the phase modulator concerned, the first resonator, and the resonator concerned. An error signal is acquired from a detecting signal and a modulating signal which are acquired by a photodetector and each photodetector which receives light from an optical system and each resonator for being arranged between a light-path-length variable means and a laser light source for making it change, respectively, and a resonator, and between two resonators, and combining both, respectively, A control circuit which has the composition of negative feedback in order to control a light-path-length variable means in accordance with the FM (frequency modulation) side band method ("Pound-Drever-HallLocking" law) using the error signal concerned.

[0011]And after a laser beam enters into a phase modulator and can give a phase modulation, while entering into the first resonator, While it constitutes so that light generated by a nonlinear optical element may enter into the second resonator, and light from the first and the second resonator is detected by a photodetector, respectively, By light path length being controlled for every resonator based on an error signal, two or more resonators are kept simultaneous to the resonance state.

[0012]After a laser beam generation method concerning this invention entered in the first resonator a laser beam by which the phase modulation was carried out, While entering in the second resonator light generated by a nonlinear optical element arranged in the resonator concerned and detecting light from the first and the second resonator, respectively, It holds to the resonance state simultaneously about two or more resonators by generating an error signal from each detecting signal and a modulating signal, and controlling each light path length for every resonator.

[0013]Therefore, of course, since it is not necessary to form a phase modulator in each preceding paragraph to each resonator, that stable locking of a resonator becomes possible by using the FM side band method according to this invention, Two or more resonators can be simultaneously locked using a small number of phase modulators rather than the conventional composition.

[0014]

[Embodiment of the Invention]this invention -- continuous oscillation (CW) -- is related with a possible laser light source and the laser beam generator using two or more resonators, and is

suitable for the application to the wavelength changing covering two or more steps, etc.

[0015]Drawing 1 is a figure for explaining the example of basic constitution of this invention notionally.

[0016]The laser beam generator 1 is provided with the laser light source 2 which outputs the laser beam of single frequency mostly.

[0017]A laser beam is sent to two or more resonators 5_X ($X=1, 2, \dots, N$) through the phase modulator 3 and the optical system 4. The optical system 4 may be made to sort out and penetrate the light which enters into the resonator of the next step [the others and if needed] which are a lens for mode matching, prism, a mirror, etc., and a dichroic mirror, an absorption filter, etc. for not letting an unnecessary light pass may be included in it. The signal generator 7 (it has a local oscillator for generating an oscillation signal.) for generating the modulating signal impressed to this is formed in the phase modulator 3.

[0018]Two or more resonators 5_X ($X=1, 2, \dots, N$) are considered as column arrangement, and have the second resonator (for example, this is set to "5₂".) arranged in the latter part rather than the first resonator (for example, this is set to "5₁".) and resonator concerned. It is not necessary to necessarily use the first resonator as the resonator of the first rank, and which resonator may be used, and which resonator may be used as long as it is located in the latter part rather than the first resonator also about the second resonator. However, in the first resonator, the nonlinear optical element (or nonlinear optical crystal) 8 is arranged. For example, although the element for wavelength changing concerning a second harmonic generation, a sum frequency generation, etc. is mentioned, the other elements (element for record, etc.) can also be used.

[0019]Among each resonator, at least about the first and the second resonator. The light-path-length variable means 9 for changing light path length, respectively is established. For example, a resonator's position and posture of a constituent child (a mirror and an optical element) are controlled using actuators, such as VCM (voice coil motor), a piezoelectric element, etc., or voltage etc. are impressed to a crystal and the optical characteristics (refractive index etc.) are controlled.

[0020]Although the optical systems 4 and 4 for mode matching and -- are arranged between the laser light source 2 and a resonator and between two resonators, these combine a required light efficiently among both.

[0021]The photodetector 6_X ($X=1, 2, \dots, N$) is formed in order to receive the light from each resonator, respectively. Although the gestalt which detects the catoptric light from a resonator, and the gestalt which detects the transmitted light of a resonator are mentioned, from a viewpoint of the size of a detecting signal, the former gestalt is preferred.

[0022]In response to the detecting signal acquired by each photodetector 6_X and the modulating signal (oscillation signal of predetermined frequency) by the signal generator 7, the digital disposal circuit 10 is a circuit for acquiring an error signal, after performing synchronous detection, and it sends out the control signal to the light-path-length variable means 9. That is, in order to control the light-path-length variable means 9 in accordance with the FM side band method using an error signal, the control circuit 11 which has the composition of negative feedback is formed.

[0023]In this composition, the laser beam emitted from the laser light source 2 enters into the phase modulator 3 with which the modulating signal by the signal generator 7 is impressed, and after it can give a phase modulation and it passes through the optical system 4, it enters into the first resonator (for example, 5₁). And the light generated by the nonlinear optical element 8 in the resonator concerned enters into the second resonator (for example, 5₂).

[0024]The light (catoptric light or transmitted light) from the first resonator and second resonator, It is detected by the photodetector 6_1 and 6_2, respectively, and light path length is controlled by the light-path-length variable means 9 for every resonator based on each error signal acquired by detection in the digital disposal circuit 10 (. [get blocked and] Variable control of the light path length of each resonator is carried out so that an error signal may serve as zero. By things, the resonator of these plurality is kept simultaneous to the resonance state (what is called a locking condition).

[0025]It may be a modulating signal of frequency which is different about the modulating signal impressed to the phase modulator 3, and the modulating signal of single frequency may be used. In drawing 1, although the modulating signal from the signal generator 7 is supplied to the one phase modulator 3, two or more phase modulators with which not only this but a modulating signal is impressed may be used. However, one or more phase modulators' being arranged on the optical path between a laser light source and the first resonator and the light outputted from the first resonator require entering into the second resonator via the phase modulation by a phase modulator.

[0026]Drawing 2 shows Example 12 constituted so that two steps of resonators for wavelength changing could be simultaneously locked by the FM side band method using one phase modulator.

[0027]In this example, the laser light source 2A which outputs the infrared light (for example, wavelength of $\lambda = 1064 \text{ nm}$) of a vertical single mode is used, and the outputted ray LT2 penetrates the phase modulators 3 (for example, KTP etc.). The modulating signal which had different frequency (these are described as "f1" and "f2", respectively.), for example is impressed to the phase modulator 3.

[0028]The light which penetrated the phase modulator 3 enters into the first resonator 5_1 through the optical system 4 containing a lens etc. At this time, the characteristic mode assumed by incident light and the resonator 5_1 assumes that it has lapped good (what is called a mode match).

[0029]It is constituted from the incidence mirror M1, two or more mirrors M2 used if needed, M3, M4, and the nonlinear optical element 8 by the resonator 5_1. That is, like a graphic display, the incidence mirror M1 and the outgoing radiation mirror M2 are arranged on a main optical path, and the nonlinear optical element 8 is arranged among both. And after the laser beam which the mirror M3 is located in M1 side, and the mirror M4 is arranged at M2 side, and entered into M1 passes through the nonlinear optical element 8 and it is reflected in order of M2, M3, and M4, respectively, the resonator is formed by returning to M1. It has composition in which the variable control is possible about the circumference light path length of the resonator 5_1. At least one position (for example, M3) in the mirror which constitutes a resonator, and posture can be changed by transportation devices, such as VCM (voice coil motor), and the driving means using piezoelectric phenomena, such as PZT. Prism, a grating, etc. may be moved as optical elements other than the mirror which constitutes a resonator. In addition, there is also a method of impressing voltage to a nonlinear optical element or an electrooptics crystal, and changing light path length to them.

[0030]After a part of catoptric light by the mirror M4 penetrates M1, light is received by the photodetector 6_1, and signal detection is performed.

[0031]Outputted ray LT6 of the resonator 5_1 enters into the second resonator 5_2 through the optical system 15 for mode matching, after being reflected by the mirrors 13 and 14.

[0032]It is constituted, for example like the above-mentioned resonator 5_1 by the resonator 5_2

using the incidence mirror m1, two or more mirrors m2, m3, m4, and the nonlinear optical element 16. That is, like a graphic display, the incidence mirror m1 and the outgoing radiation mirror m2 are arranged on a main optical path, and the nonlinear optical element 16 is arranged among both. And after the laser beam which the mirror m3 is located in m1 side, and the mirror m4 is arranged at m2 side, and entered into m1 from the optical system 15 passes through the nonlinear optical element 16 and it is reflected in order of m2, m3, and m4, respectively, the resonator is formed by returning to m1. About the circumference light path length of the resonator 5_2, it has composition in which the variable control is possible, and at least one position (for example, m3) in the mirror which constitutes a resonator, and posture can be changed by driving means by VCM etc., such as a transportation device and PZT.

[0033]After a part of catoptric light by the mirror m4 penetrates m1, light is received by the photodetector 6_2, and signal detection is performed.

[0034]Optical LT7 emitted from the mirror m2 becomes an outputted ray of the resonator 5_2, and it is irradiated outside.

[0035]Drawing 3 shows the example of basic constitution of the control system containing a phase modulator and a photodetector. Since it is considered as the circuitry same about the first and the second resonator, the portion common to both circuits is collectively shown in the figure.

[0036]As the above-mentioned frequency f1 and the modulating signal of f2 were generated, and the signal concerned was impressed to the phase modulator 3 ("EOM" shown in a figure) and being described above by the signal generator 7 shown with the sign of a signal source, a phase modulation is applied to a laser beam.

[0037]The detecting signal by a photodetector (in the example of a graphic display, it is the photodetector 6_1 about the first resonator, and is the photodetector 6_2 about the second resonator.), A modulating signal (about the signal of the frequency f1 and the second resonator, it is [resonator / first] a signal of the frequency f2) is the detection section 17 (in a figure.). A multiplier shows as a multiplier. It is sent, and synchronous detection is performed and the error signal (this is described as "Err".) acquired by this is sent to the servo control section 18. In addition, although a graphic display is omitted, the what is called "Pull-in" circuit which judges whether locking is performed based on the signal from all the light volume monitors may attach.

[0038]The servo control section 18 generates a control signal so that the level of the error signal Err may serve as zero, and it controls the light path length of a resonator by the signal concerned. That is, in the example of drawing 2, the position and posture of the mirror M3 are controlled by the first resonator 5_1, and the position and posture of the mirror m3 are controlled by the second resonator 5_2. Since what is necessary is just to use a well-known mechanism about the moving mechanism of a mirror, and a drive control circuit, the explanation beyond it is omitted. The graphic display about a filter required to take out a high frequency signal from a circuit required for signal processing, for example, the detecting signal after light-receiving, etc. is omitted (or what is necessary is just to think that it is contained in a photodetector etc.), and only the element which is to the foundations of processing is shown.

[0039]By the way, reflectance of the mirror M1 is made into "R₁" in the first above-mentioned resonator 5_1 (refer to drawing 2). When describing synthetic reflectance until just before returning to the mirror M1 again after the circumference which passed through other mirrors (M2 thru/or M4) and the elements 8 as "R_m", When the optical path of the resonator is in the state where it was adjusted good, the catoptric light of the whole resonator at the time of entering light is detected from the mirror M1 by the photodetector 6_1, and the reflectance (this is described as "R (delta)".) is given by a lower formula.

[0040]

[Equation 1]

$$R(\delta) = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

[0041] About "delta" in an upper type, it is "delta=2pi-L₁/lambda." Here, as for "lambda", the wavelength of a light source and "L₁" show the circumference light path length of the resonator, respectively. Impedance matching (consistency) will be able to be taken at the time of "R₁=R_m."

[0042] Drawing 4 is the graph charts which illustrated the reflection property (delta dependency) according to an upper type, it takes the above "delta" along a horizontal axis, takes relative reflectance (0 thru/or 1) along a vertical axis, and shows both relation. About the graph curve, it was referred to as "R₁=R_m=0.90" in consideration of conspicuousness, and finesse is set up lowness rather than the actual condition.

[0043] [One number] At the time of "delta=p-pi" (p is even number), the reflectance over which only the resonator 5_1 is covered falls, incident light enters in the resonator concerned, and internal light intensity becomes large so that it may understand from the square paragraph of the sine function sin (delta/2) being included in a formula. This is called the "resonance state" and it is referred to as "Locking" to make the resonance state hold.

[0044] In order to maintain to disturbance, such as vibration and a temperature change, so that cavity length may fulfill conditions of "delta=2 and pi-L₁ / lambda=p-pi", a variable control means of light-path-length L₁ is needed. For that purpose, what is necessary is to change a mirror (see M3 of drawing 2, and m3.), a position of an optical element, etc., or just to change the refractive index using an electrooptics element. For example, a transportation device and a driving means using PZT, VCM, a stepping motor, etc. are mentioned.

[0045] Allowable frequency full width at half maximum in a case of changing a value of delta by changing light path length of a resonator (when describing half breadth as "delta_{0.5}") They are the twice and "2delta_{0.5}". If it attaches, a decrement concerning reflectance over which only a resonator is covered is calculated from a value used as half [of a value in the peak points (delta=0, 2 pi, etc.)], and is about given by a lower formula.

[0046]

[Equation 2]

$$2 \delta_{0.5} = \frac{2 (1 - \sqrt{R_1 R_m})}{(R_1 R_m)^{\frac{1}{4}}}$$

[0047] This is called for also from delta from which the transmissivity over which only a resonator is covered becomes half [of the value in a peak point].

[0048] Drawing 5 is the graph charts which illustrated the delta dependency of relative transmittance, it takes the above "delta" along a horizontal axis, takes relative transmittance (0 thru/or 1) along a vertical axis, and shows both relation. About a graph curve, it was referred to as "R₁=R_m=0.90" in consideration of conspicuousness, and finesse is set up lowness rather than the actual condition.

[0049] Although a point relative transmittance indicates one half of the peak values to be to a figure as an arrow shows appears in both sides of a peak, a difference (width) of delta value during both points is the full width at half maximum "2anddelta_{0.5}" of allowable frequency.

[0050]When using catoptric light from the resonator 5_1 in the FM side band method, it is advantageous to take more greatly about the frequency f_1 of the above-mentioned modulating signal than penetration half width " $\delta_{0.5}$ ".

[0051]Drawing 6 shows the delta dependency of relative reflectance, and expands and shows near [in drawing 4] $\delta = 0$.

[0052]Since a tendency for relative reflectance to fall rapidly is accepted in the range (the range of 0.5 or less relative reflectance) which full width at half maximum " $2\delta_{0.5}$ " shows so that it may illustrate, when detecting catoptric light, if the frequency f_1 was set as the within the limits concerned, light penetrates and it is inconvenient.

[0053]Drawing 7 expands and shows an example (delta dependency) of an error signal (Err) generated based on a photodetection signal and a modulating signal, it takes " δ " along a horizontal axis, and a signal value (a relative value is shown, a scale is arbitrary and there is no special semantics in the value itself.) is taken and shown on a vertical axis.

[0054]When resonance frequency of a resonator approaches a frequency neighborhood of a laser beam, the error signal Err is a signal acquired based on balance of a double sideband signal (both-sides wave) to reflect, and shows the direction and size about a gap from a resonance position ($\delta = 0$). That is, in a right half plane of drawing 7, if you follow delta axis for Masakata, after reaching a positive peak value in which a value rises, and a value's falling suddenly and showing a bottom value, it carries out asymptotic to delta axis. In a left half plane of drawing 7, if you follow delta axis to a negative direction, after a value falls, and reaching a bottom value, and a value's rising suddenly and showing a peak value, it carries out asymptotic to delta axis. Thus, since a graph curve has 180-degree Symmetry-of-revolution nature mostly in a circumference of the starting point of $\delta = 0$, a direction and a size of a gap from a resonance position can be grasped from an error signal.

[0055]Therefore, if a reverse feedback system for performing position modification of components (mirror etc.) of a resonator, etc. is formed in the above-mentioned control circuit (it controls so that an error becomes zero.) and light path length of a resonator is controlled, the resonance state can be maintained. in addition -- there is no side band (ingredient of a side band) in catoptric light -- **** -- if it is made to be contained mostly, amplitude of an error signal becomes large and, generally a signal-to-noise (S/N) ratio can be enlarged.

[0056>About the nonlinear optical element 8 in the first resonator 5_1, KTP, BBO, LBO, LiNbO₃, etc. are used, for example. Periodically-Poled Crystals (for example, PP-KTP, PP-LiNbO₃, etc.) developed in recent years can also be used. When a wavelength changing element is used, after a laser beam of the second wavelength in which wavelength changing was carried out by the element concerned is outputted from the first resonator 5_1 to a laser beam of the first wavelength outputted by laser light source, it enters into the second resonator 5_2. That is, an outputted ray by which wavelength changing was carried out by round power becoming high by resonance is equivalent to the above-mentioned LT6 (refer to drawing 2) to a fundamental wave (for example, $\lambda = 1064$ nm).

[0057]When using for second harmonic generations (SHG) a crystal which was able to take phase matching by a crystal which was able to take phase matching, polarization inversion, or other means as the element 8 as an example of wavelength changing, it can change into half wavelength (for example, $\lambda = 532$ nm) to wavelength of a fundamental wave.

[0058>About an outputted ray (see LT6 of drawing 2) of the first resonator, it separates from light by which wavelength changing was not carried out by the mirror 13 (wavelength separation mirror) etc. if needed.

[0059]A fundamental wave component in which wavelength changing was carried out by the nonlinear optical element 8 from becoming the loss about a fundamental wave. It is necessary to also take into consideration and calculate wavelength conversion efficiency about reflectance " R_m " of an upper type (IEEE Journal of Quantum Electronics besides William Kozlovsky, Vol.24, No.6, p.913 (1988)).

[0060]In order to maintain the resonance state about the first resonator 5_1, For example, while dividing a detect output by the photodetector 6_1 into a low-frequency component and a high frequency component and sending a high frequency component to the detection section 17 of drawing 3, to the detection section concerned. If signalling frequency equal to the frequency f_1 of a modulating signal is supplied from the signal generator 7 (inner local oscillator) and synchronous detection is performed about both phase, the error signal Err will be acquired. The servo control section 18 which drives the mirror M3 constitutes a control means of cavity length (it is a control means of light-path-length L_1 correctly.), and as described above, it can lock a resonator based on an error signal.

[0061]Light which the mirrors 13 and 14 and the optical system 15 of drawing 2 could use outputted ray LT6 of the first resonator 5_1 for the adjustment for doubling with space modes of the second resonator 5_2, and passed through the optical system 15 enters into the incidence mirror m1 of the second resonator 5_2.

[0062>About the characteristic concerning the second resonator 5_2, it is the same as that of the resonator 5_1 fundamentally. If synthetic reflectance until just before making reflectance of the mirror m1 into " r_1 ", going other mirrors and elements around and returning to the mirror m1 again is made into " r_m ", When an optical path of a resonator is adjusted good, Reflectance of the whole resonator with which light entered from the mirror m1, A formula which replaced " R_1 " by " r_1 " and replaced " R_m " by " r_m " in the above-mentioned [an one number] formula, respectively (about delta.) Of course, it is necessary to use circumference light-path-length L_2 of the second resonator, input light wavelength, etc. It was given, for example, impedance matching will be able to be taken at the time of " $r_1=r_m$ ".

[0063]As the nonlinear optical element 16 placed into the resonator 5_2, when a crystal for second harmonic generations (BBO, CLBO, LB4 grade) is used, for example, A part of input light (for example, $\lambda = 532 \text{ nm}$) of a resonator is outputted as optical LT7 which it is changed into half wavelength (266 nm), and is shown in drawing 2. To perform such wavelength changing, it is necessary to calculate " r_m " in consideration of conversion efficiency.

[0064]What is necessary is to transpose frequency " f_1 " of a modulating signal to " f_2 " in explanation about the first resonator of the above, and just to perform a read substitute suitably, in order to maintain the resonance state about the second resonator. That is, while dividing a detect output by the photodetector 6_2 into a low-frequency component and a high frequency component and sending a high frequency component to the detection section 17, If signalling frequency equal to the frequency f_2 of a modulating signal is supplied to the detection section 17 from the signal generator (local oscillator) 7 and synchronous detection is performed about both phase, the error signal Err will be acquired. The servo control section 18 which drives the mirror m3 constitutes a control means (correctly control means of light-path-length L_2) of cavity length, and can lock a resonator based on the error signal Err.

[0065]Drawing 8 shows the frequency dependence of reflectance of each resonator, and a relation of modulation frequency, (A) The incident wave length dependency of relative reflectance which requires a figure for the first resonator 5_1 is shown, the incident wave length dependency of relative reflectance which requires the (B) figure for the second resonator 5_2 is

shown, and the (C) figure shows spectrum of light which enters into the resonator 5_1 in response to abnormal conditions with the phase modulator 3, respectively. Since the (A) figure and B (figure) are considered only within the specific wavelength circumference, a horizontal axis expresses frequency. moreover -- give priority to simplification of explanation, set frequency of light to " f_0 " ($= c/\lambda$ and c are the speed of light.), and only frequency concerned and the above-mentioned frequency f_1 , a sum frequency of f_2 , and a difference cycle are shown in the (C) figure (a graphic display -- for convenience, although line width is shown thickly) There is no meaning in particular. Although a sum frequency of f_1 and f_2 , a difference cycle, etc. are not displayed, it is taking into consideration that only modulation frequency of a request in which modulated light is contained can be chosen by choosing suitably frequency of a signal generator (local oscillator) used in the case of synchronous detection. Although frequency " f_0 " is shown in the center of a transmission band of a resonator, this is for simplification of explanation (unless locking is usually performed, not fixed to such a position.).

[0066](A) In this example, a direction of the first resonator is larger than the second resonator about penetration width so that comparison with a figure and the (B) figure may show.

[0067](C) In a figure, as a line prolonged up shows, respectively, an upper part wave of frequency " f_0+f_2 " by f_2 is located in a right flank of f_0 , and an upper part wave of frequency " f_0+f_1 " by f_1 is located in it at a place a little distant from now on. As a line prolonged caudad shows to a left side of f_0 , respectively, a bottom wave of frequency " f_0-f_2 " is located and a bottom wave of frequency " f_0-f_1 " is located in a place a little distant from now on.

[0068]In the first resonator 5_1, since frequency " f_0+f_1 " and " f_0-f_1 " are located in the outside of a transmission band, a modulated light component will be reflected, without hardly penetrating. That is, if a phase modulation is performed using the frequency f_1 which does not penetrate the first resonator, catoptric light from the first resonator can be taken out (f_0**f_1), and an error signal of the FM side band method with a high S/N ratio can be acquired.

[0069]About a light component modulated in the phase modulator 3 by f_2 whose frequency is lower than f_1 , since transmissivity is high when the first resonator 5_1 locks, most portion enters into the first resonator. For example, when it supposes that the nonlinear optical element 8 shown in drawing 2 is a crystal for second harmonic generations and light of wavelength which is the half occurs to wavelength of a fundamental wave, it will enter in the first resonator also about a phase modulation component of a high rate, and wavelength changing will be received. The frequency f_0 ($= c/\lambda$) of light which is a carrier (subcarrier) at this time, and the frequency f_2 of a modulating signal interfere, and a side wave of f_0**f_2 occurs around f_0 . And if these are frequency with high reflectance in the second resonator 5_2, catoptric light containing the ingredient concerned can be taken out from the resonator concerned, and an error signal can be acquired. That is, although a light component of " f_0**f_2 " penetrates the first resonator 5_1 mostly about the frequency f_2 , in the second resonator 5_2, it is chosen so that it may be reflected and this can be used for a lock of the second resonator.

[0070]Therefore, when performing wavelength changing as mentioned above, make into "the first wavelength" wavelength of light outputted by laser light source, and wavelength of light by which wavelength changing was carried out by a nonlinear optical element in the first resonator as "the second wavelength". When light of the wavelength concerned enters into the second resonator, while acquiring an error signal about a laser beam of the first wavelength using the catoptric light and locking the first resonator, About a laser beam of the second wavelength, an error signal can be acquired using the catoptric light, and the second resonator can be locked simultaneously.

[0071] Thus, while providing two steps of external resonators 5_1, and 5_2 to the laser light source 2 in drawing 2, Only the one phase modulator 3 that can maintain each resonator at the resonance state using the FM side band method, and a deer therefore does not need to make arrange a phase modulator in the preceding paragraph of each resonator, respectively, either, and is arranged at the preceding paragraph of the first resonator 5_1 will be required. However, as it described above about assignment of desirable modulation frequency on that occasion, Light which received abnormal conditions with the frequency f_1 is reflected with the first resonator 5_1, And it is desirable for light which received abnormal conditions with the frequency f_2 to penetrate the first resonator 5_1, and to be reflected with the second resonator 5_2 after wavelength changing, and, then, it can generate an error signal in two steps of resonators using each catoptric light. Since a large signal required for control can be taken by using catoptric light, more advantageous locking than a case where the transmitted light is used becomes possible.

[0072] In the above-mentioned explanation, in order to realize locking stabilized more about each resonator, used the different frequency f_1 and a modulating signal of f_2 , but, Composition of having made it impress the signal concerned to the phase modulator 3 may be used using a modulating signal of not only this but single frequency (it becomes advantageous by simplification and a cost aspect of composition.). Namely, what is necessary is just to fulfill conditions of a part of side wave's being reflected with the first resonator and other side waves penetrating the first resonator, and being reflected with the second resonator after wavelength changing about light which received abnormal conditions.

[0073] About a modulating signal generated by the signal generator 7. The first frequency component required to generate an error signal used in order to hold the resonance state about the first resonator, As long as it is specified that it has the second frequency component required to generate an error signal used in order to hold the resonance state about the second resonator, or these frequency components are included as an ingredient of a sum frequency, a difference cycle, or harmonics, what kind of frequency may be used.

[0074] In order for a sum frequency or a difference cycle which may be generated in the case of cross modulation not to interfere with the HARASHIN item, It is desirable that frequency of a phase modulation used with the first resonator and second resonator, respectively is not harmonics of another side mutually, not to express a ratio of frequency, for example as an integer ratio of 10 or less figures further, etc. (a matter of these is effective when choosing frequency.). When sum frequency and difference frequency set up differ from frequency of the HARASHIN item, it is also possible to generate an error signal using these sum frequencies and difference cycles.

[0075] Although a method of arranging one phase modulator to the front, and impressing it to a modulating signal rather than the first resonator as mentioned above about a phase modulator at this, and a method of impressing a modulating signal to either of them while forming two or more phase modulators are mentioned, From a viewpoint of simplification of composition, the former is preferred.

[0076] When you use different frequency (for example, f_1 , f_2), the first frequency component should be high frequency from the second frequency component ($f_1 > f_2$). Although it is desirable not to become a relation of harmonics of another side mutually, since the FM side band method is the method of forcing a noise extremely, Even if it is f_1 when almost close to f_2 ($f_1 \approx f_2$), and f_2 is a case ($f_1 < f_2$) of high frequency from f_1 , two steps of the above-mentioned locking can be performed. However, even if it raises that a S/N ratio falls in these cases, or influence of

disturbance becomes large, without a profit going up, or a profit by force, problems, such as causing destabilization by the increase in a noise component, should be considered.

[0077]Although this invention can be generalized and applied to control for locking each resonator simultaneously in a laser beam generator provided with two or more resonators, about each resonator, a gestalt shown below is mentioned, for example.

[0078](A) By a nonlinear optical element arranged inside the first resonator of a gestalt (B) that has a gain medium inside the first resonator, and amplifies and outputs a laser beam. a gestalt (C) with which a second harmonic or a third harmonic wave is generated -- a gestalt which a nonlinear optical element arranged in the second resonator is used [gestalt] as an element for light mixing, and generates light of a sum frequency by multiplexing of two laser beams, or a difference cycle.

[0079]Here, the first resonator is either of two or more resonators, and the second resonator is resonators other than the first resonator.

[0080]First, a gestalt (A) performs injection locking which amplifies a laser beam.

[0081]About a gestalt (B), like previous statement, half wavelength changing (or obtain frequency twice) is performed to wavelength of an incident wave, and wavelength changing (or obtain frequency 3 times) of $1/3$ is performed to wavelength of an incident wave by a third harmonic generation at a second harmonic generation.

[0082]In a gestalt (C), an element is irradiated with two lights, frequency (angle) ω_1 and ω_2 , and light of both sum frequency $\omega = \omega_1 + \omega_2$ can be obtained, for example.

[0083]Drawing 9 shows an example 19 of such composition, and two laser light source 2Bs, 2C, the three resonators 5_1, 5_2, and 5_3 are used for it.

[0084]An outputted ray of laser light source 2B (for example, wavelength $\lambda_1 = 532\text{nm}$) of single frequency enters into the first resonator 5_1 through the phase modulator 3 and the optical system 4 for mode matching.

[0085]The four mirrors M1 thru/or M4 and the wavelength changing element 20 are formed in the resonator 5_1, and M1, the element 20, and M2 are arranged on a main optical path. After amounting to M2 via the element 20 from M1, an optical path which light reflected here is reflected in order of M3 and M4, and returns to M1 again is formed. A part of catoptric light by the mirror M4 penetrates M1, and it is detected by the photodetector 6_1.

[0086]About control of cavity length concerning the first resonator 5_1, a transportation device and movable mechanisms, such as PZT and VCM, are provided in at least one of M1 thru/or M4.

[0087]Outputted ray LT6 of the first resonator 5_1 is carried out by the wavelength separation mirror 21 for 2 minutes, and one of these is sent to the light sensing portion 22. Photodetectors (for surveillance etc.) or a beam dump (attenuator) is used for the light sensing portion 22. Light of another side divided in the wavelength separation mirror 21 enters into the second resonator 5_2 through the optical system 23 for mode matching.

[0088]The four mirrors m1 thru/or m4 and the element 24 for sum frequency mixing are formed in the second resonator 5_2. That is, after being reflected one by one by m2 and m3 and light which entered from m1 passes through the element 24, an optical path which is reflected by m4 and returns to M1 again is formed. A part of catoptric light by the mirror m4 penetrates m1, and it is detected by the photodetector 6_2. And in order to control cavity length concerning the second resonator 5_2, a transportation device and movable mechanisms, such as PZT and VCM, are provided in at least one of m1 thru/or m4.

[0089]An outputted ray of the laser light source 2C (for example, wavelength $\lambda_2 = 750\text{nm}$)

of single frequency enters into the third resonator 5_3 through the optical system 26 for mode matching, after receiving abnormal conditions with the phase modulator 25.

[0090]The four mirrors k1 thru/or k4 and the element 24 are formed in the third resonator 5_3, and the element 24 is shared between the resonators 5_2.

[0091]In the resonator 5_3, after light which entered into the mirror k1 is reflected one by one by k2 and k3, and passing through the element 24, an optical path which is reflected by k4 and returns to k1 again is formed. A part of catoptric light by the mirror k4 penetrates k1, and it is detected by the photodetector 6_3. Although there is no necessity which controls the cavity length about the resonator 5_3, when performing the control concerned, a transportation device and movable mechanisms, such as PZT and VCM, are provided in at least one of k1 thru/or k4.

[0092]About control for the resonator 5_1 and locking concerning 5_2. While being the same as that of an already explained method, for example, impressing the frequency f1 and a modulating signal of f2 to the phase modulator 3, Modulation components of light by a signal of f1 are made to be reflected with the first resonator 5_1, and modulation components of light by a signal of f2 penetrate the first resonator 5_1, and are made to be reflected with the second resonator 5_2. And what is necessary is for the photodetector 6_2 to detect light reflected by the mirror m4 of the resonator 5_2, to acquire each error signal by synchronous detection, and just to change each cavity length by control of a movable mirror, while the photodetector 6_1 detects light reflected by the mirror M4 of the resonator 5_1. Of course, a modulating signal of single frequency instead of f1 and f2 may be impressed to the phase modulator 3. About frequency of a modulating signal impressed to the phase modulators 3 and 25, respectively, both may be decided independently, and the resonator 5_2 and 5_3 may be locked according to each, and frequency may be made the same, and the same local oscillator may be used.

[0093]In this composition, wavelength of outputted ray LT6 of the resonator concerned serves as half [of wavelength of a fundamental wave] ($\lambda/2=266\text{ nm}$) as a result of a second harmonic generation by the wavelength changing element 20 in the first resonator 5_1.

[0094]And as a result of carrying out frequency addition of light and the above-mentioned LT6 in the element 20 for light mixing from the laser light source 2C, outputted ray LT8 is obtained from the element concerned. When describing wavelength of optical LT6 as " λ ", anew wavelength (λ) of optical LT8, In " $1/\lambda=1/\lambda_1+1/\lambda_2$ " which rewrote " $\omega=\omega_1+\omega_2$ " to an expression of relations about wavelength, it can be found by substituting $\lambda_1=266$ (second harmonic) and $\lambda_2=750$, respectively, and λ is set to about 196 nm.

[0095]Thus, after a laser beam penetrates a phase modulator with which a modulating signal was impressed, Composition it was made to enter one by one can be used for two or more resonators (for example, resonator considered as column arrangement), without wavelength changing's being carried out by nonlinear optical element arranged in the first resonator, and passing through other phase modulators after that by it. And each resonator can be kept simultaneous to the resonance state by the FM side band method using an error signal generated from a photodetection signal concerning a modulating signal and each resonator also in this case.

[0096]In composition shown in drawing 9, if the third resonator 5_3 is entered using an outputted ray of laser light source 2B, without using the laser light source 2C, an outputted ray of 3 time frequency by a sum frequency generation can be obtained.

[0097]For example, light which passed through the phase modulator 3 from laser light source 2B is carried out with a half mirror etc. for 2 minutes, About light of one of these, the first resonator 5_1 is entered via the optical system 4 for mode matching, and the third resonator 5_3 is entered

about light of another side via the optical system 26 for mode matching or the phase modulator 25, and the optical system 26 for mode matching. Since one (2ω) twice the frequency of fundamental frequency (ω) is obtained by the element 20 in the first resonator 5_1 and frequency of a pan " $\omega+2\omega=3\omega$ " is obtained by the element 24 for sum frequency mixing, Wavelength of outputted ray LT8 drops to 1/3 to the original wavelength depended on laser light source 2B (for example, $532 / 3 \approx 177$ nm).

[0098]About a phase modulator used in this case. The one phase modulator 3 may be used in common to the first and the second resonator or the first thru/or the third resonator, and the phase modulator 25 may be used for exclusive use to the third resonator using the phase modulator 3 to the first and the second resonator. And about frequency of a modulating signal used for control for locking each resonator, different frequency to each resonator may be used, and the same frequency may be used to two or more resonators.

[0099]In addition, although this invention can be carried out with various kinds of gestalten, it is preferred that setting out whose penetration width of the first resonator of the above is wider than penetration width of the second resonator is used about width of a transmission band concerning two or more resonators (see drawing 8 (A) and (B)).

[0100]The frequency f_2 of a phase modulation signal used in order to hold the resonance state of the second resonator, Equivalent to frequency (this is described as " δ_1 ,".) equivalent to penetration width of the first resonator almost, equivalent to frequency (this is described as " δ_2 ,".) which considers it as a low frequency wave rather than this, and is equivalent to penetration width of the second resonator almost or it is considered as high frequency rather than this. That is, " $f_2 \leq \delta_1$ " is conditions for a side wave depended on f_2 to penetrate the first resonator mostly, and " $f_2 > \delta_2$ " is conditions for a side wave to be mostly reflected in the second resonator.

[0101]And although " $f_1 > \delta_1$," and " $f_2 \leq \delta_1$," are preferred, the former is conditions for a side wave depended on the frequency f_1 to exist in an outside zone of a penetration belt of the first resonator, and the latter is conditions for a side wave depended on the frequency f_2 to be in a transmission band of the first resonator.

[0102]For locking where a resonator was stabilized, it is required to be in phase relation where each of two or more modulation frequency, those sum frequency signals, or a difference cycle signal was stabilized to frequency (oscillating frequency by the signal generator 7) of a corresponding modulating signal. For that purpose, it is preferred to enable it to adjust phase delay quantity independently to each modulation frequency in the case of synchronous detection. For example, what is necessary is to insert a delay (delay) circuit between the photodetector 6_1, and 6_2 and the detection section 17, and just to constitute in drawing 3, so that it can adjust about phase retardation of a photodetection signal.

[0103]a deer being carried out, and light generated by a nonlinear optical element arranged in the resonator concerned to the second resonator in this invention, without passing through a phase modulator, after entering in the first resonator a laser beam by which the phase modulation was carried out, [make enter and] While detecting light from the first and the second resonator, respectively, two or more resonators can be kept simultaneous to the resonance state by generating an error signal from each detecting signal and a modulating signal, and controlling each light path length for every resonator.

[0104]Therefore, various kinds of advantages shown below are acquired.

[0105]- Since two or more resonators can be stably locked by the FM side band method using a small number of phase modulators rather than before, an equipment configuration is simplified

and it is suitable for a miniaturization or reduction of cost.

[0106]- In application to ultraviolet radiation or ultraviolet rays, it is useful. For example, when wavelength of an outputted ray by which wavelength changing was carried out with the first resonator of the above is 400 nm or less, it is not necessary to use a highly efficient phase modulator. That is, although a receipt route of an element will be restricted about a phase modulator which can be used for abnormal conditions of ultraviolet rays etc. with inconvenience that need high tension or element size's being large and cost including a power supply increase, In the above-mentioned composition, since it ends with a phase modulator which such a problem is cheap absolutely none and is easy to use, time which reduction of of cost is attained and manufacture of a device takes can be shortened.

[0107]- Composition and a method of having been suitable for a rise and a miniaturization of efficiency can be provided, and it is effective for reduction of power consumption, or reduction of a disposition space.

[0108]

[Effect of the Invention]According to the invention concerning claim 1 or claim 16, so that clearly from the place indicated above. Of course, since it is not necessary to form a phase modulator in each preceding paragraph to each resonator, it can lock two or more resonators simultaneously using a small number of phase modulators that stable locking of a resonator becomes possible by using the FM side band method rather than before. In the application to ultraviolet rays etc., it is not necessary to use a special phase modulation.

[0109]According to the invention concerning claim 2 or claim 17, each resonator can be locked more in stability by using the modulating signal of different frequency.

[0110]Since it is hard to receive the influence by the temperature change of a nonlinear optical element, etc. according to the invention concerning claims 3 thru/or 6 and claims 18 and 19, it is stabilized more and wavelength changing using the element concerned can be performed efficiently.

[0111]According to the invention concerning claim 7 or claims 20 and 21, each resonator can be simultaneously locked using a signal with the frequency component corresponding to each resonator.

[0112]According to the invention concerning claim 8 or claim 22, a signal-noise ratio is high and locking stable to disturbance becomes possible.

[0113]According to the invention concerning claim 9, a desired output can be obtained by amplification of a laser beam.

[0114]According to the invention concerning claim 10, the outputted ray of short wavelength can be obtained by a harmonic generation.

[0115]According to the invention concerning claim 11, the outputted ray of various wavelength can be obtained by generating of a sum frequency or a difference cycle.

[0116]A laser beam can be entered one by one to the resonator arranged without passing through a phase modulator, and each resonator can be locked simultaneously, and according to the invention concerning claim 12 or claim 23, there are few losses of light volume and it is efficient.

[0117]Since according to claims 13 thru/or 15 and claims 24 thru/or 26 an error signal can be acquired using the detecting signal of catoptric light while being able to distinguish and use each modulation frequency about the first resonator and second resonator, it is advantageous to locking of a resonator.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] A laser light source which outputs a laser beam.

A signal generator which generates a modulating signal impressed to a phase modulator and the phase modulator concerned.

Two or more resonators containing the second resonator arranged in the latter part rather than the first resonator and resonator concerned.

A nonlinear optical element arranged in a resonator of the above first.

An optical system for being arranged between a light-path-length variable means for changing light path length of each resonator, respectively, and the above-mentioned laser light source and a resonator, and between two resonators, and combining both, A control circuit which has the composition of negative feedback in order to acquire an error signal from a detecting signal acquired by photodetector which receives light from each resonator, respectively, and the above-mentioned photodetector, and the above-mentioned modulating signal and to control the above-mentioned light-path-length variable means in accordance with the FM side band method using the error signal concerned.

After it is the laser beam generator provided with the above, and the above-mentioned laser beam enters into the above-mentioned phase modulator and can give a phase modulation, while entering into the first resonator of the above, While light from that light generated by the above-mentioned nonlinear optical element enters into the second resonator of the above, the above-mentioned first, and the second resonator is detected by the above-mentioned photodetector, respectively, By light path length being controlled for every resonator based on the above-mentioned error signal, a resonator of these plurality is kept simultaneous to the resonance state.

[Claim 2] While arranging one or more phase modulators with which a modulating signal of different frequency is impressed in a laser beam generator indicated to claim 1 on an optical path between a laser light source and the first resonator, A laser beam generator characterized by making it light outputted from the first resonator enter into the second resonator via a phase modulator.

[Claim 3] A laser beam generator, wherein wavelength changing is performed by a nonlinear optical element arranged in the first resonator in a laser beam generator indicated to claim 1.

[Claim 4] A laser beam generator, wherein wavelength changing is performed by a nonlinear optical element arranged in the first resonator in a laser beam generator indicated to claim 2.

[Claim 5] While a laser beam of the second wavelength in which wavelength changing was carried out by nonlinear optical element enters into the second resonator to a laser beam of the first wavelength outputted by laser light source in a laser beam generator indicated to claim 3, A laser beam generator, wherein the first resonator is maintained at the resonance state about a laser beam of the first wavelength and the second resonator is maintained at the resonance state about a laser beam of the second wavelength.

[Claim 6] While a laser beam of the second wavelength in which wavelength changing was carried out by nonlinear optical element enters into the second resonator to a laser beam of the first wavelength outputted by laser light source in a laser beam generator indicated to claim 4, A laser beam generator, wherein the first resonator is maintained at the resonance state about a laser beam of the first wavelength and the second resonator is maintained at the resonance state about a laser beam of the second wavelength.

[Claim 7]In a laser beam generator indicated to claim 2, In order to hold the resonance state about the first frequency component and second resonator concerning an oscillation signal required to generate an error signal used in order to hold the resonance state about the first resonator. A laser beam generator a signal generator's generating a modulating signal which has the second frequency component concerning an oscillation signal required to generate an error signal to be used, and impressing the signal concerned to either 1 or two or more phase modulators.

[Claim 8]A laser beam generator in which the first frequency component is characterized by being high frequency rather than the second frequency component in a laser beam generator indicated to claim 7.

[Claim 9]A laser beam generator, wherein the first resonator has a gain medium in the inside and amplifies and outputs a laser beam in a laser beam generator indicated to claim 1.

[Claim 10]A laser beam generator, wherein harmonics are generated by a nonlinear optical element arranged inside the first resonator in a laser beam generator indicated to claim 1.

[Claim 11]A laser beam generator using as an element for light mixing a nonlinear optical element arranged in the second resonator in a laser beam generator indicated to claim 1, and generating light of a sum frequency by multiplexing of two laser beams, or a difference cycle.

[Claim 12]After penetrating a phase modulator with which a modulating signal was impressed in a laser beam generator indicated to claim 1, A laser beam wavelength changing was carried out [a laser beam] by nonlinear optical element arranged in the first resonator, A laser beam generator, wherein each resonator is kept simultaneous to the resonance state by the FM side band method using an error signal generated from a photodetection signal which enters into two or more resonators one by one, without passing through other phase modulators, and starts the above-mentioned modulating signal and two or more above-mentioned resonators.

[Claim 13]A laser beam generator, wherein penetration width of the first resonator is made larger than penetration width of the second resonator in a laser beam generator indicated to claim 1.

[Claim 14]Frequency of a phase modulation signal used in a laser beam generator indicated to claim 1 in order to hold the resonance state of the second resonator, A laser beam generator which are almost equivalent to frequency equivalent to penetration width of the first resonator, are almost equivalent to frequency which is made into a low frequency wave rather than this, and is equivalent to penetration width of the second resonator, or considering as high frequency rather than this.

[Claim 15]Frequency of a phase modulation signal used in a laser beam generator indicated to claim 1 in order to hold the resonance state of the first resonator, A laser beam generator, wherein frequency of a phase modulation signal used in order to be made larger than penetration width of the first resonator and to hold the resonance state of the second resonator is below penetration width of the first resonator.

[Claim 16]While detecting light which enters light by which the phase modulation was carried out to two or more resonators after a phase modulation about a laser beam, and is obtained from each resonator, respectively, An error signal is acquired from a detected signal and a modulating signal used for a phase modulation, . Carry out variable control of the light path length who starts each resonator in accordance with the FM side band method. [enter / are a laser beam generation method and / light generated by a nonlinear optical element arranged in the resonator concerned after entering in the first resonator a laser beam by which the phase modulation was carried out with a phase modulator in the second resonator and] A laser beam generation method keeping a resonator of these plurality simultaneous to the resonance state by generating an error signal

from each detecting signal and the above-mentioned modulating signal, and controlling each light path length for every resonator while detecting light from the above-mentioned first and the second resonator, respectively.

[Claim 17] While entering into the first resonator, a laser beam by which the phase modulation was carried out with a phase modulator by which a modulating signal of different frequency is impressed in a laser beam generation method indicated to claim 16, A laser beam generation method characterized by making it light outputted from the first resonator enter into the second resonator, without passing through a phase modulator.

[Claim 18] A laser beam generation method performing wavelength changing about a laser beam by a nonlinear optical element arranged in the first resonator in a laser beam generation method indicated to claim 16.

[Claim 19] While entering into the second resonator, a laser beam of the second wavelength in which wavelength changing was carried out by nonlinear optical element in a laser beam generation method indicated to claim 18 in response to a laser beam of the first wavelength outputted by laser light source, A laser beam generation method holding the first resonator to the resonance state about a laser beam of the first wavelength, and holding the second resonator to the resonance state about a laser beam of the second wavelength.

[Claim 20] A laser beam generation method using higher harmonic signals, those sum frequency signals, or a difference cycle signal of an original modulating signal impressed to a phase modulator, or the signal concerned as a modulating signal used for the FM side band method in a laser beam generation method indicated to claim 16.

[Claim 21] The first frequency component concerning an oscillation signal required to generate an error signal used in a laser beam generation method indicated to claim 16 in order to hold the resonance state about the first resonator, The second frequency component concerning an oscillation signal required to generate an error signal used in order to hold the resonance state about the second resonator, A laser beam generation method characterized by making it contained in a signal of a sum frequency of a modulating signal impressed to a phase modulator, or the signal concerned, a difference cycle, or harmonics.

[Claim 22] A laser beam generation method specifying the first frequency component in frequency higher than the second frequency component in a laser beam generation method indicated to claim 21.

[Claim 23] In a laser beam generation method indicated to claim 16, after a phase modulation, A laser beam in which wavelength changing was carried out by nonlinear optical element arranged in the first resonator, A laser beam generation method holding the resonance state simultaneously about each resonator by the FM side band method using an error signal generated from a photodetection signal and a modulating signal which enter into two or more resonators one by one, without passing through other phase modulators, and start two or more above-mentioned resonators.

[Claim 24] A laser beam generation method with which a direction of the first resonator is characterized by a twist setting penetration width as the second resonator widely in a laser beam generation method indicated to claim 16.

[Claim 25] Frequency of a phase modulation signal used in a laser beam generation method indicated to claim 16 in order to hold the resonance state of the second resonator, A laser beam generation method characterized by what it is almost equivalent to frequency equivalent to penetration width of the first resonator, or it is considered as a low frequency wave rather than this, is almost equivalent to penetration width of the second resonator, or was specified to high

frequency rather than this.

[Claim 26] Frequency of a phase modulation signal used in a laser beam generation method indicated to claim 16 in order to hold the resonance state of the first resonator, A laser beam generation method making below into penetration width of the first resonator frequency of a phase modulation signal used in order to make it larger than penetration width of the first resonator and to hold the resonance state of the second resonator.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-311467

(P2002-311467A)

(43) 公開日 平成14年10月23日 (2002. 10. 23)

(51) Int.Cl.⁷ 識別記号

G 0 2 F 1/37

H 0 1 S 3/10

3/109

F I

G 0 2 F 1/37

H 0 1 S 3/10

3/109

データベース(参考)

2 K 0 0 2

C 5 F 0 7 2

Z

審査請求 未請求 請求項の数26 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2001-112682(P2001-112682)

(22) 出願日 平成13年4月11日(2001. 4. 11)

(71) 出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 35 号

(72) 発明者

増田 久

東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 35 号 ソニ

株式会社内

(74) 代理人

100069051

弁理士 小松 祐治

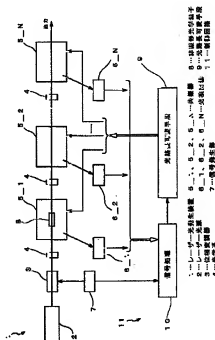
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザー光発生装置及び方法

(57) 【要約】

【課題】 複数の共振器を備えたレーザー光発生装置において、安定したロッキングを実現するとともに、そのためにコスト上昇や消費電力の増大を伴わないようにする。

【解決手段】 レーザー光発生装置 1 において、レーザー光源 2、位相変調器 3 とこれに変調信号を印加するための信号発生部 7、共振器 5_X (X=1, 2, ...) を設ける。そして、共振器 5_X 中に非線形光学素子 8 を設けるとともに、各共振器の光路長を変化させるための光路長可変手段 9 を設ける。各共振器からの光を受光する光検出器 6_X (X=1, 2, ...) の検出信号を用いて誤差信号を得て、FM サイドバンド法に従って光路長可変手段 9 を制御することで共振器長の制御に係る負帰還構成の制御回路 11 を形成する。レーザー光が位相変調を与えられてから共振器 5_X 1 に入射されるとともに、非線形光学素子 8 により発生される光が共振器 5_X 2 に入射され、複数の共振器が同時に共振状態に保たれるようにした。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 レーザー光を出力するレーザー光源と、位相変調器及び当該位相変調器に印加する変調信号を生成する信号発生部と、

第一の共振器及び当該共振器よりも後段に配置される第二の共振器を含む複数の共振器と、
上記第一の共振器中に配置された非線形光学素子と、
各共振器の光路長をそれぞれ変化するための光路長可変手段と、

上記レーザー光源と共振器との間及び 2 つの共振器の間に配置されて両者を結合させるための光学系と、
各共振器からの光をそれぞれ受光する光検出器と、
上記光検出器によって得られる検出信号及び上記変調信号から誤差信号を得て、当該誤差信号を用いた F M サイドバンド法に従って上記光路長可変手段を制御するために負帰還の構成を有する制御回路とを備えたレーザー光発生装置であって、

上記レーザー光が上記位相変調器に入射されて位相変調を与えられてから上記第一の共振器に入射されるとともに、上記非線形光学素子により発生される光が上記第二の共振器に入射されること、

そして、上記第一及び第二の共振器からの光が上記光検出器によってそれぞれ検出されるとともに、上記誤差信号に基づいて共振器毎に光路長が制御されることで、これら複数の共振器が同時に共振状態に保たれることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 2】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
異なる周波数の変調信号が印加される 1 つ又は複数の位相変調器を、レーザー光源と第一の共振器との間の光路上に配置するとともに、第一の共振器から出力される光が、位相変調器を介することなく第二の共振器に入射されるようにしたことを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 3】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の共振器内に配置される非線形光学素子によって波長変換が行われることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 4】 請求項 2 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の共振器内に配置される非線形光学素子によって波長変換が行われることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 5】 請求項 3 に記載したレーザー光発生装置において、
レーザー光源により出力される第一の波長のレーザー光に対して、非線形光学素子によって波長変換された第二の波長のレーザー光が第二の共振器に入射されるとともに、
第一の波長のレーザー光について第一の共振器が共振状態に保たれ、かつ、第二の波長のレーザー光について第二の共振器が共振状態に保たれるようにしたことを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 6】 請求項 4 に記載したレーザー光発生装置において、
レーザー光源により出力される第一の波長のレーザー光に対して、非線形光学素子によって波長変換された第二の波長のレーザー光が第二の共振器に入射されるとともに、
第一の波長のレーザー光について第一の共振器が共振状態に保たれ、かつ、第二の波長のレーザー光について第二の共振器が共振状態に保たれるようにしたことを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 7】 請求項 2 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な発振信号に係る第一の周波数成分及び第二の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な発振信号に係る第二の周波数成分を有する変調信号を信号発生部が発生させて、当該信号を逐一は複数の位相変調器のいずれかに印加することを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 8】 請求項 7 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の周波数成分が第二の周波数成分よりも高周波であることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 9】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の共振器が、その内部に利得媒質を有しており、レーザー光を増幅して出力することを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 10】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
第一の共振器の内部に配置された非線形光学素子によって高調波が発生されることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 11】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
第二の共振器内に配置された非線形光学素子が光混合用素子とされ、2 つのレーザー光の合成による和周波又は差周波の光を発生させることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項 12】 請求項 1 に記載したレーザー光発生装置において、
変調信号が印加された位相変調器を透過した後に、第一の共振器内に配置された非線形光学素子によって波長変換されたレーザー光が、他の位相変調器を経ることなく複数の共振器に順次に入射され、
上記変調信号及び上記複数の共振器に係る光検出信号から生成される誤差信号を用いた F M サイドバンド法によ

り各共振器が同時に共振状態に保たれることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項13】 請求項1に記載したレーザー光発生装置において、

第一の共振器の透過幅が第二の共振器の透過幅よりも広くされていることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項14】 請求項1に記載したレーザー光発生装置において、

第二の共振器の共振状態を保持するために用いられる位相変調信号の周波数が、第一の共振器の透過幅に相当する周波数とほぼ同等であるか又はこれよりも低周波とされ、かつ、第二の共振器の透過幅に相当する周波数とほぼ同等であるか又はこれよりも高周波とされることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項15】 請求項1に記載したレーザー光発生装置において、

第一の共振器の共振状態を保持するために用いられる位相変調信号の周波数が、第一の共振器の透過幅より大きくされ、

第二の共振器の共振状態を保持するために用いられる位相変調信号の周波数が、第一の共振器の透過幅以下であることを特徴とするレーザー光発生装置。

【請求項16】 レーザー光についての位相変調の後、複数の共振器に位相変調された光を入射させ、各共振器から得られる光をそれぞれ検出するとともに、検出された信号と位相変調に使用した変調信号から誤差信号を得て、FMサイドバンド法に従って各共振器に係る光路長を可変制御する、レーザー光発生方法であって、位相変調器によって位相変調されたレーザー光を第一の共振器に入射させた後、当該共振器内に配置された非線形光学素子により発生される光を第二の共振器に入射させ、

そして、上記第一及び第二の共振器からの光をそれぞれ検出するとともに、各検出信号及び上記変調信号から誤差信号を生成して、共振器毎にそれぞれの光路長を制御することにより、これら複数の共振器を同時に共振状態に保つようにしたことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項17】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

異なる周波数の変調信号が印加される位相変調器によって位相変調されたレーザー光を、第一の共振器に入射するとともに、第一の共振器から出力される光が、位相変調器を経ることなく第二の共振器に入射されるようにしたことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項18】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

第一の共振器内に配置される非線形光学素子によってレーザー光についての波長変換を行うことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項19】 請求項18に記載したレーザー光発生方法において、

レーザー光源により出力される第一の波長のレーザー光を受けて、非線形光学素子によって波長変換された第二の波長のレーザー光を第二の共振器に入射するとともに、第一の波長のレーザー光について第一の共振器を共振状態に保持し、かつ、第二の波長のレーザー光について第二の共振器を共振状態に保持することを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項20】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

FMサイドバンド法に用いる変調信号として、位相変調器に印加された原変調信号又は当該信号の高調波信号又はそれらの和周波信号若しくは差周波信号を使用することを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項21】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

第一の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な発振信号に係る第一の周波数成分と、第二の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な発振信号に係る第二の周波数成分とが、位相変調器に印加される変調信号又は当該信号の和周波若しくは差周波あるいは高調波の信号に含まれるようにしたことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項22】 請求項21に記載したレーザー光発生方法において、

第一の周波数成分を、第二の周波数成分よりも高い周波数に規定したことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項23】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

位相変調の後、第一の共振器内に配置された非線形光学素子によって波長変換されたレーザー光を、他の位相変調器を経ることなく複数の共振器に順次に入射し、上記複数の共振器に係る光検出信号及び変調信号から生成される誤差信号を用いたFMサイドバンド法により各共振器について同時に共振状態を保持することを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項24】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

第一の共振器の方が、第二の共振器よりも透過幅を広く設定したことを特徴とするレーザー光発生方法。

【請求項25】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

第二の共振器の共振状態を保持するために用いる位相変調信号の周波数が、第一の共振器の透過幅に相当する周波数とほぼ同等であるか又はこれよりも低周波とされ、かつ、第二の共振器の透過幅とほぼ同等であるか又はこれよりも高周波に規定したことを特徴とするレーザー光発生方法。

生方法。

【請求項26】 請求項16に記載したレーザー光発生方法において、

第一の共振器の共振状態を保持するために用いる位相変調信号の周波数を、第一の共振器の透過幅より大きくし、

第二の共振器の共振状態を保持するために用いる位相変調信号の周波数を、第一の共振器の透過幅以下にしたことを特徴とするレーザー光発生方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、レーザー光源と複数の共振器を用いたレーザー光発生装置において、混変調キャリアを利用して安定なロッピングを実現するための技術に関する。

【0002】

【従来の技術】 レーザー光発生装置における安定な共振器ロッピング法として、F Mサイドバンド法（「Pound-Drever-Hall Locking」法）が知られており、近赤外光から可視光域に至る外部共振器のロッピングに広く利用されている。

【0003】 また、この方法以外にも、偏光を用いる方法（Hansch, Couillaud, Optics Communications, 1980等の文献を参照されたい。）が挙げられる。例えば、波長板を通過したレーザー光を共振器に入射させるとともに、共振器からの、偏光状態の異なる2つのビームの検出信号に基いて誤差信号を得て、共振器の共振状態を保持するロッピング方法が提案されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、従来の装置においては、下記に示すような問題がある。

【0005】 ・偏光法等においては、共振器への入射光量等に変化が生じた場合や、吸収のある光学素子（特に紫外線領域における光吸収のある素子）を共振器内に有する場合等において、発熱による温度変化に伴って当該光学素子の特性が変わり、位相遅延量が変化してしまうといった理由で波長のオフセットが発生し易く、安定性に問題がある。

【0006】 ・F Mサイドバンド法又は「Pound-Drever-Hall Locking」法と称する方法では、誤差信号を発生させるために位相変調器を用いて側波（側帯波）を立てる必要があるが、特に紫外光を変調して側波を立てる場合に必要となるのは、透過率が高く、かつ動作電圧の低い、高性能な位相変調器である。しかし、そのような変調器の入手が困難であるため、入手可能な位相変調器を使用する場合には、高電圧の高周波を駆動する回路等が必要となり、コスト上昇や消費電力の増大を招くといった欠点と、実用性の面で問題がある。

【0007】 ・複数の共振器を用いた構成において各共振器を同時にロッピングする場合に、共振器の数が多く

なると、各段階に配置される位相変調器の数も多くなってしまいますので、装置の大型化やコスト上昇を招く原因となる。これは、従来の構成では、各共振器の前段にそれぞれ位相変調器が配置されるためであり、その分の配置スペースが大きくなってしまう。

【0008】 そこで、本発明は、複数の共振器を備えたレーザー光発生装置において、安定したロッピングを実現するとともに、そのためにコスト上昇や消費電力の増大を伴わないようにすることを課題とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】 本発明に係るレーザー光発生装置は、上記した課題を解決するために、下記に示す構成要素を備えたものである。

【0010】 ・レーザー光を出力するレーザー光源
・位相変調器及び当該位相変調器に印加する変調信号を生成する信号発生部
・第一の共振器及び当該共振器よりも後段に配置される第二の共振器を含む複数の共振器
・第一の共振器中に配置された非線形光学素子
・各共振器の光路長をそれぞれ変化させるための光路長可変手段

・レーザー光源と共振器との間及び2つの共振器の間に配置されて両者を結合させるための光学系
・各共振器からの光をそれぞれ受光する光検出器
・各光検出器によって得られる検出信号及び変調信号から誤差信号を得て、当該誤差信号を用いたF M（周波数変調）サイドバンド法（「Pound-Drever-Hall Locking」法）に従って光路長可変手段を制御するために負帰還の構成を有する制御回路。

【0011】 そして、レーザー光が位相変調器に入射されて位相変調を与えられてから第一の共振器に入射されるとともに、非線形光学素子により発生される光が第二の共振器に入射されるように構成し、第一及び第二の共振器からの光が光検出器によってそれぞれ検出されるときに、誤差信号に基いて共振器毎に光路長が制御されることで、複数の共振器が同時に共振状態に保たれるようにしたものである。

【0012】 また、本発明に係るレーザー光発生方法は、位相変調されたレーザー光を第一の共振器に入射させた後、当該共振器内に配置された非線形光学素子により発生される光を第二の共振器に入射させ、第一及び第二の共振器からの光をそれぞれ検出するとともに、各検出信号及び変調信号から誤差信号を生成して、共振器毎にそれぞれの光路長を制御することにより、複数の共振器について同時に共振状態に保持するものである。

【0013】 従って、本発明によれば、F Mサイドバンド法を用いることで共振器の安定なロッピングが可能となることは勿論、各共振器に対してそれぞれ前段に位相変調器を設ける必要がないので、従来の構成よりも少ない数の位相変調器を用いて複数の共振器を同時にロッ

くすることができ、

【0014】

【発明の実施の形態】本発明は、連続発振（CW）可能なレーザ光源と、複数の共振器を用いたレーザ光発生装置に関するものであり、例えば、複数段階に亘る波長変換等への適用に好適である。

【0015】図1は、本発明の基本構成例を概念的に説明するための図である。

【0016】レーザ光発生装置1は、ほぼ単一周波数のレーザ光を出力するレーザ光源2を備えている。【0017】レーザ光は、位相変調器3、光学系4を経て複数の共振器5_X（X=1、2、…、N）に送られる。尚、光学系4には、モードマッチングのためのレンズ、プリズム、ミラー等、他、必要に応じて、次段の共振器に入射する光を選別して透過させ、不要な光を通さないためのダイクロイックミラーや吸収フィルター等を含む場合がある。また、位相変調器3には、これに印加する変調信号を生成するための信号発生部7（発振信号を発生させるための局部発振器を有する。）が設けられている。

【0018】複数の共振器5_X（X=1、2、…、N）は縦列配置とされ、第一の共振器（例えば、これを「5₁」とする。）及び当該共振器よりも後段に配置される第二の共振器（例えば、これを「5₂」とする。）を有する。尚、第一の共振器を必ずしも初段の共振器とする必要はなく、いずれの共振器でも構わない。また、第二の共振器についても、第一の共振器よりも後段に位置されていれば、いずれの共振器でも構わない。但し、第一の共振器中には、非線形光学素子（あるいは非線形光学結晶）8が配置されている。例えば、第二高調波発生、和周波発生等に係る波長変換用の素子が挙げられるが、それ以外の素子（記録用の素子等）を使用することもできる。

【0019】各共振器のうち、少なくとも第一及び第二の共振器については、光路長をそれぞれ変化させるための光路長可変手段9が設けられており、例えば、共振器の構成素子（ミラーや光学素子）の位置や姿勢を、VCM（ボイスコイルモータ）等のアクチュエータ、圧電素子等を用いて制御したり、結晶に電圧等を印加して光学的特性（屈折率等）を制御するものである。

【0020】尚、レーザ光源2と共振器との間や、2つの共振器の間にはモードマッチング用の光学系4、4、…が配置されているが、これらは必要な光を両者の間で効率良く結合させるものである。

【0021】光検出器6_X（X=1、2、…、N）は、各共振器からの光をそれぞれ受光するために設けられたものである。尚、共振器からの反射光を検出する形態と、共振器の透過光を検出する形態が挙げられるが、検出信号の大きさの観点からは前者の形態が好ましい。

【0022】信号処理回路10は、各光検出器6_Xに

よって得られる検出信号と、信号発生部7による変調信号（所定周波数の発振信号）を受けて、同期検波を行った後に誤差信号を得るための回路であり、その制御信号を光路長可変手段9に送出する。つまり、誤差信号を用いたFMサイドバンド法に従って光路長可変手段9を制御するために負帰還の構成を有する制御回路11が形成されている。

【0023】本構成において、レーザ光源2から出射されたレーザ光は、信号発生部7による変調信号が印加される位相変調器3に入射され、位相変調を与えられたから光学系4を経た後で、第一の共振器（例えば、5₁）に入射される。そして、当該共振器内の非線形光学素子8により発生される光が第二の共振器（例えば、5₂）に入射される。

【0024】第一の共振器や第二の共振器からの光（反射光又は透過光）は、光検出器6₁、6₂によってそれぞれ検出され、信号処理回路10での検波によって得られるそれぞれの誤差信号等に基づいて光路長可変手段9により共振器毎に光路長が制御される（つまり、誤差信号がゼロとなるように各共振器の光路長が可変制御される。）ことで、これら複数の共振器が同時に共振状態に保たれる（所謂ロックング状態）。

【0025】尚、位相変調器3に印加される変調信号については、異なる周波数の変調信号であっても良いし、また単一周波数の変調信号でも良い。また、図1では、信号発生部7からの変調信号が一つの位相変調器3に供給されるが、これに限らず、変調信号が入射される複数の位相変調器を用いても良い。但し、一つ又は複数の位相変調器が、レーザ光源と第一の共振器との間の光路上に配置されること、そして、第一の共振器から出力される光が、位相変調器による位相変調を介することなく第二の共振器に入射されることを要する。

【0026】図2は、1つの位相変調器を用いて、2段階の波長変換用共振器をFMサイドバンド法で同時にロックできるように構成した例12を示している。

【0027】本例では、縦単一モードの赤外光（例えば、波長 $\lambda=1064\text{ nm}$ ）を出力するレーザ光源2Aを用いており、その出力光LT2は位相変調器3（例えば、KTP等）を透過する。尚、位相変調器3には、例えば、異なる周波数（これらをそれぞれ「f₁」、「f₂」と記す。）をもった変調信号が印加される。

【0028】位相変調器3を透過した光は、レンズ等を含む光学系4を経て第一の共振器5₁に入射される。尚、このとき、入射光と共振器5₁に想定される固有モードは良好に重なっているものとする（所謂モードマッチ）。

【0029】共振器5₁については、入射ミラーM1と、必要に応じて使用される複数枚のミラーM2、M3、M4及び非線形光学素子8で構成されている。つまり、図示のように、入射ミラーM1と出射ミラーM2が

主光路上に配置され、両者の間に非線形光学素子8が配置されている。そして、ミラーM3がM1の側に位置され、ミラーM4がM2の側に配置されていて、M1に入射されたレーザー光は、非線形光学素子8を経た後、M2、M3、M4の順でそれぞれ反射されてからM1に戻るにより共振器が形成されている。尚、共振器5_1の周囲光路長についてはその可変制御が可能な構成となっており、共振器を構成するミラーのうちの少なくとも一つ（例えば、M3）の位置や姿勢を、VCM（ボイスコイルモータ）等の移動手段や、PZT等の圧電現象を利用した駆動手段によって変化させることができる。また、共振器を構成するミラー以外の光学要素として、プリズムやグレーティング等を移動させる場合もある。この他、非線形光学素子や電気光学結晶に電圧を印加して光路長を変化させる方法もある。

【0030】ミラーM4による反射光の一部は、M1を透過した後、光検出器6_1により受光されて信号検出が行われる。

【0031】共振器5_1の出力光LT6は、ミラー13、14によって反射された後、モードマッチング用の光学系15を経て第二の共振器5_2に入射される。

【0032】共振器5_2については、例えば、上記共振器5_1と同様に、入射ミラーm1と複数枚のミラーm2、m3、m4及び非線形光学素子16を用いて構成されている。つまり、図示のように、入射ミラーm1と出射ミラーm2が主光路上に配置され、両者の間に非線形光学素子16が配置されている。そして、ミラーm3がm1の側に位置され、ミラーm4がm2の側に配置されていて、光学系15からm1に入射されたレーザー光は、非線形光学素子16を経た後、m2、m3、m4の順でそれぞれ反射されてからm1に戻るにより共振器が形成されている。尚、共振器5_2の周囲光路長についてはその可変制御が可能な構成となっており、共振器を構成するミラーのうちの少なくとも一つ（例えば、m3）の位置や姿勢を、VCM等による移動手段やPZT等の駆動手段によって変化させることができる。

【0033】ミラーm4による反射光の一部は、M1を透過した後、光検出器6_2により受光されて信号検出が行われる。

【0034】また、ミラーm2から出射される光LT7が、共振器5_2の出力光となって外部に照射される。

【0035】図3は、位相変調器及び光検出器を含む制

御系の基本構成例を示したものである。尚、第一及び第二の共振器について同様の回路構成とされるため、図には両回路に共通の部分と併せて示している。

【0036】信号源の記号で示す信号発生部7により、上記周波数f1、f2の変調信号が発生され、当該信号が位相変調器3（図に示す「EOM」）に印加されて上記したようにレーザー光に位相変調がかけられる。

【0037】光検出器（図示の例では、第一の共振器について光検出器6_1、第二の共振器について光検出器6_2である。）による検出信号と、変調信号（第一の共振器については周波数f1の信号、第二の共振器については周波数f2の信号）が光検出17（図には、マルチプライヤとして掛け算器で示す。）に送られて同期検波が行われ、これにより得られた誤差信号（これを「Err」と記す。）がサーボ制御部18に送られる。尚、この他、図示は省略するが、全光量モニターからの信号をもとにロッギングを実行するか否かを判定する、所謂「Pull-in」回路が付帯されても良い。

【0038】サーボ制御部18は誤差信号Errのレベルがゼロとなるように制御信号を生成して、当該信号によって共振器の光路長を制御する。つまり、図2の例において、第一の共振器5_1ではミラーM3の位置や姿勢が制御され、第二の共振器5_2ではミラーm3の位置や姿勢が制御される。尚、ミラーの移動機構、駆動制御回路等については周知の機構を使用すれば良いので、それ以上の説明は割愛する。また、信号処理に必要な回路、例えば、受光後の検出信号から高周波信号を取り出すに必要なフィルタ等についての図示は省略して（あるいは光検出器等に含まれると考えれば良い。）、処理の基本となる要素だけを示している。

【0039】ところで、上記した第一の共振器5_1（図2参照）において、ミラーM1の反射率を「R₁」とし、その他のミラー（M2乃至M4）や素子8を経た周囲の後に再びミラーM1に戻る直前までの合成反射率を「R_s」と記すとき、共振器の光路が良好に調整された状態となっている場合に、ミラーM1から光を入射した場合における共振器全体の反射率は、光検出器6_1により検出され、その反射率（これを「R(δ)」と記す。）が下式で与えられる。

【0040】

【数1】

$$R(\delta) = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

【0041】尚、上式中の「δ」については、「δ=2π・L₁/λ」である。ここで、「λ」は光源の波長、「L₁」は共振器の周囲光路長をそれぞれ示している。

「R₁=R_m」のときにインピーダンスマッチング（整合）がとれた状態になる。

【0042】図4は上式に従う反射特性（δ依存性）を

例示したグラフ図であり、横軸に上記「 δ 」をとり、縦軸に相対反射率（0乃至1）をとって両者の関係を示したものである。尚、グラフ曲線については、見易さを考慮して「 $R_1 = R_0 = 0.90$ 」とし、かつフィネスを実際よりも低めに設定している。

【0043】[数1]式中に正弦関数 $\sin(\delta/2)$ の二乗項が含まれていることから分かるように、「 $\delta = p \cdot \pi$ 」（ p は偶数）のときに、共振器511のみかけの反射率が低下して、入射光が当該共振器内に入って内部の光強度が大きくなる。これを「共振状態」と呼び、共振状態を保持させることを「ロックする」という。

【0044】共振や温度変化等の外乱に対して、共振器長が「 $\delta = 2 \cdot \pi \cdot L_1 / \lambda = p \cdot \pi$ 」の条件を満たすように維持するためには、光路長 L_1 の可変制御手段が必要とされる。そのためには、ミラー（例えば、図2のM3、m3を参照。）や光学素子の位置等を変化させたり、あるいは電気光学素子を用いてその屈折率等を変化させれば良い。例えば、PZT、VCM、ステッピングモータ等を用いた移動手段や駆動手段が挙げられる。

【0045】共振器の光路長を変化させることで δ の値を変化させる場合の、許容周波数半値全幅（半値幅を「 $\delta_{0.5}$ 」と記すとき、その2倍、「 $2\delta_{0.5}$ 」である。）については、共振器のみかけの反射率に係る減少分が、そのピーク点（ $\delta = 0, 2\pi$ 等）での値の半分となる値から求められ、おおよそ下式で与えられる。

【0046】

[数2]

$$2\delta_{0.5} = \frac{2(1 - \sqrt{R_1 R_m})}{(R_1 R_m)^{\frac{1}{4}}}$$

【0047】尚、これは共振器のみかけの透過率がピーク点での値の半分になる δ からも求められる。

【0048】図5は、相対透過率の依存性を例示したグラフ図であり、横軸に上記「 δ 」をとり、縦軸に相対透過率（0乃至1）をとって両者の関係を示したものである。尚、グラフ曲線については、見易さを考慮して「 $R_1 = R_0 = 0.90$ 」とし、かつフィネスを実際よりも低めに設定している。

【0049】図に矢印で示すように、相対透過率がそのピーク値の1/2を示すポイントがピークの両側に現れるが、両ポイント間の δ の差（幅）が許容周波数の半値全幅「 $2 \cdot \delta_{0.5}$ 」である。

【0050】FMサイドバンド法において共振器511からの反射光を用いる場合には、上記変調信号の周波数 f_1 について透過半幅「 $\delta_{0.5}$ 」よりも大きくとるのが有利である。

【0051】図6は相対反射率の依存性を示すもので、図4における $\delta = 0$ の付近を拡大して示したものである。

【0052】図示するように、半値全幅「 $2\delta_{0.5}$ 」の示す範囲（相対反射率0.5以下の範囲）では、相対反射率が急激に低下する傾向が認められるので、反射光を検出する場合に、周波数 f_1 を当該範囲内に設定したのでは光が透過してしまい都合が悪い。

【0053】図7は、光検出信号及び変調信号に基いて生成される誤差信号（Err）の一例（ δ 依存性）を拡大して示したものであり、横軸に「 δ 」をとり、縦軸に信号値（相対値）を示し、スケールは任意であり、値そのものに特別な意味はない。）をとって示している。

【0054】誤差信号Errは、共振器の共振周波数がレーザー光の周波数付近に近づいたときに、反射する両側帯信号（両側波）のバランスに基づいて得られる信号であり、共振位置（ $\delta = 0$ ）からのずれに関してその方向と大きさを示している。つまり、図7の右半面においては、 δ 軸を正方向に進んでいくと値が上昇して正のピーク値に達し、それから急に値が低下してボトム値を示してから δ 軸に漸近していく。また、図7の左半面においては、 δ 軸を負方向に進んでいくと値が低下してボトム値に達し、それから急に値が上昇してピーク値を示してから δ 軸に漸近していく。このように、グラフ曲線が $\delta = 0$ の原点回りに180°の回転対称性をほぼ有しているため、共振位置からのずれの方向と大きさを誤差信号から把握することができる。

【0055】よって、共振器の構成要素（ミラー等）の位置修正等を行うための負のフィードバック系を、上記制御回路において形成し（誤差がゼロになるように制御を行う。）、共振器の光路長を制御すれば、その共振状態を保つことができる。尚、反射光にサイドバンド（側波帯の成分）がなくべく多く含まれるようにすると、誤差信号の振幅が大きくなり、信号対雑音（S/N）比を一般に大きくすることができる。

【0056】第一の共振器511内の非線形光学素子8については、例えば、KTP、BBO、LBO、LiNbO₃等が用いられる。また、近年開発されている、Periodically-Poled Crystals（例えば、PP-KTP、PP-LiNbO₃等）を使うこともできる。波長変換素子を用いる場合には、レーザー光源により出力される第一の波長のレーザー光に対して、当該素子によって波長変換された第二の波長のレーザー光が第一の共振器511から出力された後に、第二の共振器52に入射される。つまり、基本波（例えば、 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ）に対して、共振により巡回パワーが高くなって波長変換された出力光が上記LT6（図2参照）に相当する。

【0057】波長変換例として、第二高調波発生（SHG）用に位相整合のとれた結晶、又は分極反転等の手段で位相整合のとれた結晶を素子として用いる場合には、基本波の波長に対して半分の波長（例えば、 $\lambda = 532 \text{ nm}$ ）に変換することができる。

【0058】第一の共振器の出力光（図2のLT6を参

照)については、必要に応じてミラー13(波長分離ミラー)等により波長交換されなかった光と分離される。

【0059】尚、非線形光学素子8により波長交換された基本波成分も、基本波についての損失となることから、上式の反射率「 R_0 」に関して波長交換効率も考慮して計算する必要がある(William Kozlovsky他, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.24, No.6, p.913(1988))。

【0060】また、第一の共振器5_1について共振状態を維持するには、例えば、光検出器6_1による検出出力を低周波成分と高周波成分に分け、高周波成分を図3の検波部17に送るとともに、当該検波部には、変調信号の周波数 f_1 と等しい周波数信号を信号発生部7(内の局部発振器)から供給して、両者の位相について同期検波を行えば、誤差信号 E_{rr} が得られる。ミラーM3を駆動するサーボ制御部18は、共振器長の制御手段を構成しており(正確には光路長 L_1 の制御手段である。)、上記したように誤差信号に基いて共振器をロックすることができる。

【0061】図2のミラー13、14や光学系15は、第一の共振器5_1の出力光 L_7 を、第二の共振器5_2の空間モードに合わせ込むための調整用を使用することができ、光学系15を経た光は、第二の共振器5_2の入射ミラー m_1 に入射される。

【0062】第二の共振器5_2に係る特性について、基本的には共振器5_1と同様であり、ミラー m_1 の反射率を「 r_1 」とし、その他のミラーや素子を周回して再びミラー m_1 に戻る直前までの合成反射率を「 r_m 」とすると、共振器の光路が良好に調整されている場合には、ミラー m_1 から光が入射された共振器全体の反射率は、上記【数1】式において、「 R_1 」を「 r_1 」に、「 R_m 」を「 r_m 」にそれぞれ置換した式(8)については、勿論、第二の共振器の周回光路長 L_2 や入力光波長等を使用する必要がある。)で与えられ、例えば、「 $r_1 = r_m$ 」のときにインピーダンスマッチングがとれた状態になる。

【0063】共振器5_2内に置かれた非線形光学素子16として、例えば、第二高調波発生用の結晶(BBO、CLBO、LB4等)を用いた場合には、共振器の入力光(例えば、 $\lambda = 532\text{nm}$)の一部が、半分の波長(266nm)に変換されて図2に示す光 L_7 として出力される。尚、このような波長変換を行う場合には、変換効率を考慮して「 r_m 」を計算する必要がある。

【0064】第二の共振器について共振状態を維持するには、上記第一の共振器に関する説明において変調信号の周波数 f_1 を「 f_2 」に置き換えて適宜に読み替えを行えば良い。つまり、光検出器6_2による検出出力を低周波成分と高周波成分に分け、高周波成分を検波部17に送るとともに、変調信号の周波数 f_2 と等しい

周波数信号を信号発生部(局部発振器)7から検波部17に供給して、両者の位相について同期検波を行えば、誤差信号 E_{rr} が得られる。ミラー m_3 を駆動するサーボ制御部18は、共振器長の制御手段(正確には光路長 L_2 の制御手段)を構成しており、誤差信号 E_{rr} に基いて共振器をロックすることができる。

【0065】図8は、各共振器の反射率の周波数依存性と、変調周波数の関係について示したものであり、

(A)図が第一の共振器5_1に係る相対反射率の入射波長依存性を示し、(B)図が第二の共振器5_2に係る相対反射率の入射波長依存性を示し、(C)図は位相変調器3によって変調を受けて共振器5_1に入射する光のスペクトラムをそれぞれ示している。尚、(A)図、B(図)については、特定の波長周辺に限って考えているので、横軸は周波数を表している。また、(C)図には、説明の簡便化を優先し、光の周波数を「 f_0 」($=c/\lambda$ 、 c は光速度。)とし、当該周波数と上記周波数 f_1 、 f_2 との和周波、差周波のみを示しており(図示の便宜上、縦線を太く示しているが、特に意味はない。)、 f_1 と f_2 の和周波、差周波等を表示していないが、同期検波の際に用いる信号発生部(局部発振器)の周波数を適宜に選択することで、変調光の含まれる所望の変調周波数のみを選ぶことができることを考慮している。また、周波数「 f_0 」が共振器の透過帯域の中央に示されているが、これは説明の簡便化のためである(通常はロックを行わない限り、このような位置には固定されない。))。

【0066】(A)図と(B)図との比較から分かるように、この例では透過幅に関して、第一の共振器の方が、第二の共振器よりも広くなっている。

【0067】(C)図において、 f_0 の右脇には、上方に延びる線でそれぞれ示すように、 f_2 による周波数「 $f_0 + f_2$ 」の上側波が位置され、これからやや離れたところに、 f_1 による周波数「 $f_0 + f_1$ 」の上側波が位置されている。また、 f_0 の左脇には、下方に延びる線でそれぞれ示すように、周波数「 $f_0 - f_2$ 」の下側波が位置され、これからやや離れたところに周波数「 $f_0 - f_1$ 」の下側波が位置されている。

【0068】第一の共振器5_1において、周波数「 $f_0 + f_1$ 」や「 $f_0 - f_1$ 」は透過帯域の外側に位置するので、変調された光成分はほとんど透過せずに反射されてしまう。つまり、第一の共振器を透過しないような周波数 f_1 を用いて位相変調を行えば、第一の共振器からの反射光を取り出して「 $f_0 \pm f_1$ 」, S/N 比の高い、FMサイドバンド法の誤差信号を得ることができる。

【0069】また、位相変調器3において f_1 よりも周波数の低い f_2 で変調された光成分については、第一の共振器5_1がロックしたときに透過率が高いので、かなりの部分が第一の共振器に入射される。例えば、図2

に示す非線形光学素子8が第二高調波発生用結晶であるとし、基本波の波長に対してその半分である波長の光が発生する場合に、高い割合の位相変調成分についても第一の共振器内に入射されて、波長変換を受けることになる。このときキャリア（搬送波）である光の周波数 f_0 ($=c/\lambda$)と、変調信号の周波数 f_2 とが干渉して、 f_0 の周囲に $f_0 \pm f_2$ の側波が発生する。そして、これらが第二の共振器5_2において反射率の高い周波数であれば、当該共振器から当該成分を含む反射光を取り出して、誤差信号を得ることができる。即ち、周波数 f_2 については、「 $f_0 \pm f_2$ 」の光成分が第一の共振器5_1をほぼ透過するが、第二の共振器5_2では反射されるように選ばれており、これを第二の共振器のロックに用いることができる。

【0070】従って、上記のように波長変換を行う場合に、レーザー光源により出力される非線形光学素子によって波長変換された光の波長を「第二の波長」として、当該波長の光が第二の共振器に入射されるとき、第一の波長のレーザー光についてはその反射光を利用して誤差信号を得て第一の共振器をロックするとともに、第二の波長のレーザー光については、その反射光を利用して誤差信号を得て第二の共振器を同時にロックすることができる。

【0071】このように、図2ではレーザー光源2に対して、2段階の外部共振器5_1、5_2を設けるとともに、F/Mサイドバンド法を用いて各共振器を共振状態に保つことができ、しかも、そのために、各共振器の前段に位相変調器をそれぞれ配置させる必要がなく、第一の共振器5_1の前段に配置される一つの位相変調器3だけで済むことになる。但し、その際に望ましい変調周波数の割り当てに関して、上記したように、周波数 f_1 により変調を受けた光が第一の共振器5_1で反射されること、そして、周波数 f_2 により変調を受けた光が第一の共振器5_1を透過し、かつ波長変換後に第二の共振器5_2で反射されることが望ましく、そのときには2段階の共振器においてそれぞれ反射光を利用して誤差信号を生成することができる。尚、反射光を用いることにより制御に必要な信号を大きくとれるので、透過光を用いる場合よりも有利なロックが可能になる。

【0072】上記の説明では、各共振器についての、より安定したロックングを実現するために、異なる周波数 f_1 、 f_2 の変調信号を用いたが、これに限らず、単一周波数の変調信号を用いて、当該信号を位相変調器3に印加するようにした構成でも良い（構成の簡単化やコスト面で有利となる。）。即ち、変調を受けた光について、側波の一部が第一の共振器で反射されること、そして、他の側波が第一の共振器を透過し、かつ波長変換後に第二の共振器で反射されるという条件を満たせば良い。

【0073】また、信号発生部7により発生される変調信号については、第一の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な第一の周波数成分と、第二の共振器について共振状態を保持するために用いる誤差信号を生成するのに必要な第二の周波数成分を有しているが、又はこれらの周波数成分を和周波若しくは差周波あるいは高調波の成分として含むように規定されていれば、如何なる周波数を用いても構わない。

【0074】尚、混変調の際に発生する可能性のある和周波や差周波が原信号と干渉しないためには、第一の共振器と第二の共振器とでそれぞれ使用する位相変調器の周波数が、互いに他方の高調波でないこと、さらには周波数の比が、例えば10桁以下の整数比として表されないこと等が望ましい（これらの事項は周波数の選択に際して有効である。）。また、和周波や差周波数が、原信号の周波数と異なるように設定した場合において、これらの和周波や差周波を用いて誤差信号を生成することも可能である。

【0075】位相変調器については、上記のように1つの位相変調器を、第一の共振器よりも手前に配置してこれに変調信号に印加する方法と、複数の位相変調器を設けるとともに、そのうちのいずれかに変調信号を印加する方法とが挙げられるが、構成の簡単化の観点からは前者が好ましい。

【0076】異なる周波数（例えば、 f_1 、 f_2 ）を用いる場合に、第一の周波数成分が第二の周波数成分よりも高周波であること（ $f_1 > f_2$ ）、また、互いに他方の高調波の関係とならないことが望ましいが、F/Mサイドバンド法は極めてノイズに強い方法であるため、 f_1 がほぼ f_2 に近い場合（ $f_1 \approx f_2$ ）、あるいは f_2 が f_1 より高周波の場合（ $f_1 < f_2$ ）であっても、上記した2段階のロックングを行うことができる。但し、これらの場合には、 S/N 比が下がったり、利得が上がらずに外乱の影響が大きくなること、あるいは利得を無理に上げてもノイズ成分の増加により不安定化を招くこと等の問題に配慮すべきである。

【0077】本発明は、2以上の共振器を備えたレーザー光発生装置において、それぞれの共振器を同時にロックするための制御に一般化して適用することができるが、各共振器については、例えば、下記に示す形態が挙げられる。

【0078】（A）第一の共振器の内部に利得媒質を有しており、レーザー光を増幅して出力する形態
（B）第一の共振器の内部に配置された非線形光学素子によって、第二高調波又は第三高調波が発生される形態
（C）第二の共振器内に配置された非線形光学素子が光混合用素子とされ、2つのレーザー光の合波による和周波又は差周波の光を発生させる形態。

【0079】尚、ここで、第一の共振器とは、複数の共

振器のいずれかであり、第二の共振器とは、第一の共振器以外の共振器である。

【0080】先ず、形態(A)は、レーザー光を増幅するインジェクションロッキングを行うものである。

【0081】また、形態(B)について、既述のように、第二高調波発生では、入射波の波長に対して半分の波長変換(あるいは2倍周波数を得ること)が行われ、また、第三高調波発生では、入射波の波長に対して3分の1の波長変換(あるいは3倍周波数を得ること)が行われる。

【0082】形態(C)では、例えば、2つの(角)周波数 ω_1 、 ω_2 の光を素子に照射して両者の和周波 ω ($=\omega_1+\omega_2$)の光を得ることができる。

【0083】図9は、そのような構成の一例19を示したものであり、2つのレーザー光源2B、2Cと、3つの共振器5_1、5_2、5_3を用いている。

【0084】単一周波数のレーザー光源2B(例えば、波長 $\lambda=532\text{nm}$)の出力光は、位相変調器3、モードマッチング用光学系4を経て、第一の共振器5_1に入射される。

【0085】共振器5_1には、4枚のミラーM1乃至M4と波長変換素子20が設けられていて、M1、素子20、M2が主光路上に配置されている。尚、M1から素子20を介してM2に達した後、ここで反射された光がM3、M4の順に反射されて再びM1に戻る光路が形成されている。また、ミラーM4による反射光の一部がM1を透過して光検出器6_1により検出される。

【0086】第一の共振器5_1に係る共振器長の制御については、M1乃至M4のうち、少なくとも1つにPZTやVCM等の移動手段及び可動機構が設けられている。

【0087】第一の共振器5_1の出力光LT6は、波長分離ミラー21で2分されて、その一方が受光部22に送られる。尚、受光部22には、光検出器(監視用等。)又はビームダンパ(減衰器)が用いられる。また、波長分離ミラー21で分かれた他方の光がモードマッチング用光学系23を経て第二の共振器5_2に入射される。

【0088】第二の共振器5_2には、4枚のミラーm1乃至m4及び和周波混合用の素子24が設けられている。即ち、m1から入射された光が、m2、m3で順次反射されてから、素子24を経た後、m4で反射されて再びM1に戻る光路が形成されている。また、ミラーm4による反射光の一部がm1を透過して光検出器6_2により検出される。そして、第二の共振器5_2に係る共振器長の制御を行うために、m1乃至m4のうち、少なくとも1つにPZTやVCM等の移動手段及び可動機構が設けられている。

【0089】単一周波数のレーザー光源2C(例えば、波長 $\lambda=750\text{nm}$)の出力光は、位相変調器25で

変調を受けてから、モードマッチング用光学系26を経て第三の共振器5_3に入射される。

【0090】第三の共振器5_3には、4枚のミラーk1乃至k4及び素子24が設けられており、素子24が共振器5_2との間で共有されている。

【0091】共振器5_3において、ミラーk1に入射された光は、k2、k3で順次反射されてから、素子24を経た後、k4で反射されて再びk1に戻る光路が形成されている。また、ミラーk4による反射光の一部がk1を透過して光検出器6_3により検出される。尚、共振器5_3について、その共振器長の制御を行う必然性はないが、当該制御を行う場合には、k1乃至k4のうち、少なくとも1つにPZTやVCM等の移動手段及び可動機構が設けられる。

【0092】共振器5_1、5_2に係るロッキングのための制御については、既に説明した方法と同様であって、例えば、周波数f1、f2の変調信号を位相変調器3に印加するとともに、f1の信号による光の変調成分が第一の共振器5_1で反射されるようにし、f2の信号による光の変調成分が第一の共振器5_1を透過して第二の共振器5_2で反射されるようにする。そして、共振器5_1のミラーM4で反射された光を光検出器6_1で検出するとともに、共振器5_2のミラーm4で反射された光を光検出器6_2で検出し、同期検波によってそれぞれの誤差信号を得て、各共振器長を可動ミラーの制御により変化させれば良い。勿論、f1、f2ではなく単一周波数の変調信号を位相変調器3に印加しても良い。また、位相変調器3と25にそれぞれ印加する変調信号の周波数については、両者を独立に決めて、共振器5_2、5_3を各別にロックしても良いし、また、周波数を同じにして同一の局部発振器を使っても良い。

【0093】本構成では、第一の共振器5_1内の波長変換素子20による第二高調波発生の結果、当該共振器の出力光LT6の波長が基本波の波長の半分($\lambda/2=266\text{nm}$)となる。

【0094】そして、レーザー光源2Cから光と上記LT6が光混合用の素子20において、周波数加算された結果、当該素子から出力光LT8が得られる。光LT8の波長を改めて「 λ_1 」と記すとき、光LT8の波長(λ)は、「 $\omega=\omega_1+\omega_2$ 」を波長についての関係式に書き直した、「 $1/\lambda=1/\lambda_1+1/\lambda_2$ 」において、 $\lambda_1=266$ (第二高調波)、 $\lambda_2=750$ をそれぞれ代入することにより求め、 λ が約196nmとなる。

【0095】このように、レーザー光は、変調信号が印加された位相変調器を透過した後、第一の共振器内に配置された非線形光学素子によって波長変換され、その後、他の位相変調器を経ることなく、複数の共振器(例えば、縦列配置とされた共振器)に順次に入射され

るようにした構成を用いることができる。そして、この場合にも、変調信号及び各共振器に係る光検出信号から生成される誤差信号を用いたＦＭサイドバンド法により各共振器を同時に共振状態に保つことができる。

【００９６】尚、図９に示す構成において、レーザー光源２Ｃを用いず、レーザー光源２Ｂの出力光を用いて第三の共振器５₃に入射させると、和周波発生による３倍周波数の出力光を得ることができる。

【００９７】例えば、レーザー光源２Ｂから位相変調器３を経た光を、ハーフミラー等によって２分し、その一方の光についてはモードマッチング用光学系４を介して第一の共振器５₁に入射させ、他方の光については、モードマッチング用光学系２あるいは位相変調器２５及びモードマッチング用光学系２６を介して第三の共振器５₃に入射させる。第一の共振器５₁内の素子２０により、基本周波数（ ω ）の２倍の周波数（ 2ω ）が得られ、和周波混合用の素子２４により、さら「 $\omega+2\omega=3\omega$ 」の周波数が得られるので、出力光１Ｔ８の波長はレーザー光源２Ｂによる元の波長に対して３分の１となる（例えば、 $532/3 \approx 177\text{ nm}$ ）。

【００９８】尚、この場合に使用する位相変調器については、１つの位相変調器３を、第一及び第二の共振器あるいは第一乃至第三の共振器に対して共通に用いても良いし、また、第一及び第二の共振器に対して位相変調器３を用い、第三の共振器に対して位相変調器２５を専用に用いても良い。そして、各共振器をロックするための制御に用いる変調信号の周波数については、それぞれの共振器に対して異なる周波数を用いても良いし、また、２以上の共振器に対して同一の周波数を用いても良い。

【００９９】この他にも、各種の形態で本発明を実施することができるが、複数の共振器に係る透過帯域の幅に関しては、上記第一の共振器の透過帯幅が第二の共振器の透過帯幅よりも広い設定にされていることが好ましい（図８（Ａ）、（Ｂ）を参照。）。

【０１００】また、第二の共振器の共振状態を保持するために用いられる位相変調信号の周波数「 f_2 」を、第一の共振器の透過帯に相当する周波数（これを「 Δ_1 」と記す。）とほぼ同等か又はこれよりも低周波とし、かつ、第二の共振器の透過帯に相当する周波数（これを「 Δ_2 」と記す。）とは同等か又はこれよりも高周波とする。つまり、「 $f_2 \leq \Delta_1$ 」は、 f_2 による側波が第一の共振器をほぼ透過するための条件であり、「 $f_2 \geq \Delta_2$ 」は側波が第二の共振器においてほぼ反射されるための条件である。

【０１０１】そして、「 $f_1 \geq \Delta_1$ 」、「 $f_2 \leq \Delta_1$ 」が好ましいが、前者は、周波数「 f_1 」による側波が、第一の共振器の透過帯の外側帯域に存在するための条件であり、後者は、周波数「 f_2 」による側波が、第一の共振器の透過帯域内にあるための条件である。

【０１０２】共振器の安定したロックングのためには、

複数の変調周波数又はそれらの和周波信号若しくは差周波信号の各々が、対応する変調信号の周波数（信号発生部７による発振周波数）に対して安定した位相関係にあることが必要である。そのためには、同期検波の際にそれぞれの変調周波数に対して独立に位相遅延量を調整できるようにすることが好ましい。例えば、図３において、光検出器６₁、６₂と検波部１７との間に遅延（ディレイ）回路を介して、光検出信号の位相遅延について調整を行えるように構成すれば良い。

【０１０３】しかして、本発明では、位相変調されたレーザー光を第一の共振器に入射させた後、当該共振器中に配置された非線形光学素子により発生される光を、位相変調器を経ることなく第二の共振器に入射させ、そして、第一及び第二の共振器からの光をそれぞれ検出するとともに、各検出信号及び変調信号から誤差信号を生成して、共振器毎にそれぞれの光路長を制御することにより、複数の共振器を同時に共振状態に保つことができる。

【０１０４】従って、下記に示す各種の利点を得られる。

【０１０５】・従来よりも少ない数の位相変調器を用いて、複数の共振器をＦＭサイドバンド法で安定にロックすることができるため、装置構成が簡素化され、小型化やコストの低減に好適である。

【０１０６】・紫外光や紫外線への適用において有用である。例えば、上記第一の共振器により波長変換された出力光の波長が４００ nm以下である場合において、高性能な位相変調器を使う必要がない。つまり、紫外線等の変調に利用できる位相変調器については、高電圧を必要としたり、素子サイズが大きいこと、電源を含めたコストが嵩むといった不都合を伴い、素子の入経路が限られてしまうが、上記の構成では、このような問題は一切なく、安価で使い易い位相変調器で済むため、コストの低減が可能となり、また、装置の製造に要する時間を短縮できる。

【０１０７】・効率の上昇や小型化に適した構成及び方法を提供でき、消費電力の低減や配置スペースの低減にとって有効である。

【０１０８】

【発明の効果】以上に記載したところから明らかなように、請求項１や請求項１６に係る発明によれば、ＦＭサイドバンド法を用いることで共振器の安定なロックングが可能となることは勿論、各共振器に対してそれぞれの前段に位相変調器を設ける必要がないので、従来よりも少ない数の位相変調器を用いて複数の共振器を同時にロックすることができる。また、紫外線等への適用において、特別な位相変調を用いる必要がない。

【０１０９】請求項２や請求項１７に係る発明によれば、異なる周波数の変調信号を用いることによって各共振器をより安定にロックすることができる。

【0110】請求項3乃至6や、請求項18及び19に係る発明によれば、非線形光学素子の温度変化等による影響を受け難いので、当該素子を使った波長変換をより安定して効率良く行うことができる。

【0111】請求項7や請求項20、21に係る発明によれば、各共振器に対応する周波数成分をもった信号を使って、それぞれの共振器を同時にロックすることができる。

【0112】請求項8や請求項22に係る発明によれば、信号対ノイズ比が高く、外乱に対して安定したロックが可能になる。

【0113】請求項9に係る発明によれば、レーザー光の増幅により所望の出力を得ることができる。

【0114】請求項10に係る発明によれば、高調波発生により短波長の出力光を得ることができる。

【0115】請求項11に係る発明によれば、和周波や差周波の発生により各種波長の出力光を得ることができる。

【0116】請求項12や請求項23に係る発明によれば、位相変調器を経ることなく配置された共振器に対して順次にレーザー光を入射させて各共振器を同時にロックすることができ、光量の損失が少なく効率が良い。

【0117】請求項13乃至15、請求項24乃至26によれば、第一の共振器と第二の共振器について、それ

ぞれの変調周波数を区別して使用できるとともに、反射光の検出信号を用いて誤差信号を得ることができるので、共振器のロックングにとって有利である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る基本構成例を示す説明図である。

【図2】図3とともに本発明の構成例を示す図であり、本図は全体構成についてその要部を示す。

【図3】位相変調器及び光検出器を含む制御系の構成例を示す図である。

【図4】相対反射率の δ 依存性を示すグラフ図である。

【図5】相対透過率の δ 依存性を示すグラフ図である。

【図6】相対反射率の δ 依存性について要部を拡大して示す図である。

【図7】誤差信号の δ 依存性を示す図である。

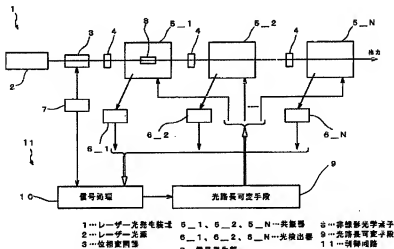
【図8】反射率の周波数依存性と変調周波数との関係について説明するための図である。

【図9】本発明に係る別の構成例を示す図である。

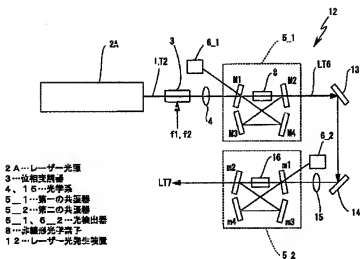
【符号の説明】

1、12、19…レーザー光発生装置、2、2A、2B、2C…レーザー光源、3、25…位相変調器、4、15、23、26…光学系、5_1…第一の共振器、5_2…第二の共振器、6_X (X=1、2、…)…光検出器、7…信号発生部、8、20…非線形光学素子、9…光路長可変手段、11…制御回路

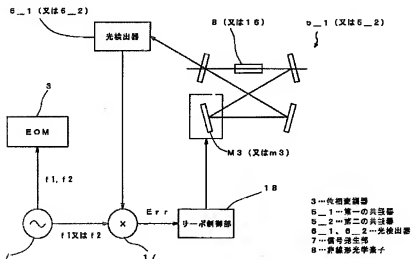
【図1】



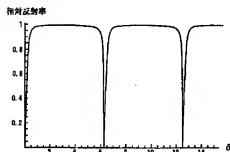
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

